

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інститут Енергозбереження та Енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В. А. Попов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020р.

## **Магістерська дисертація**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»  
спеціалізації Системи забезпечення споживачів електричною енергією  
на тему: «Управління електроспоживанням на об'єктах підземного  
електрифікованого транспорту»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ОЕ-91мп

Федоренко Дмитро Сергійович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Замулко А.І. \_\_\_\_\_

Консультант:

нормоконтроль:

Прокопенко І.Д. \_\_\_\_\_

Рецензент: \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря  
Сікорського»**

Інститут/факультет Інститут енергозбереження та енергоменеджменту  
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Спеціалізація Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.А. Попов  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту  
Федоренко Дмитро Сергійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Управління електроспоживанням на об'єктах підземного електрифікованого транспорту»  
науковий керівник дисертації к.т.н., доц. Замулко Анатолій Ігорович,  
затверджені наказом по університету від «03» листопада 2020 р. № 3198-с
2. Строк подання студентом дисертації 14 грудня 2020 року
3. Об'єкт дослідження: режими споживання електричної енергії підземним електрифікованим транспортом
4. Предмет дослідження: методи та засоби управління електроспоживанням електрифікованого транспорту
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
  - Аналіз показників ефективності використання енергії рекуперації в електрифікованому міському транспорті – метрополітені.
  - На основі аналізу традиційних схем теплопостачання та вентиляції станцій метрополітену запропонувати нове схемне рішення для системи теплопостачання підземних споруд метрополітену з використанням повітряних теплонасосних установок.
  - Обґрунтувати доцільність побудови та обрати варіанти конструктивного виконання вітрогенератора, який буде встановлений в тунелі метрополітену.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: діаграми кількості спожитої електроенергії на тягу рухомим складом КП «Київський метрополітен», Блок-схема вимірювального комплексу енергії рекуперації, принципові схеми зимового режиму повітряного опалення та літнього режиму кондиціонування приміщень станції метро на базі ПХМ, Принципова схема системи моніторингу на базі Smart Grid

7. Орієнтовний перелік публікацій:

- «Оптимізація енергоспоживання шляхом використання системи накопичення рекуперативної енергії» Збірник матеріалів XII Науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина». 7-8 травня 2020 р.

- «Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації електрифікованого підземного транспорту» Збірник матеріалів III Науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ, 26-27 листопада 2020 р.

8. Консультанти розділів дисертації

нормоконтроль: ас. Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання 31 травня 2019 року

#### Календарний план

№	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Огляд літературних джерел по обраній темі	01.03.20-19.03.20	
2	Робота над статтею на конференцію «Енергетика. Екологія. Людина»	20.03.20-30.03.20	
3	Аналіз способів електропостачання об'єктів КП «Київський метрополітен	01.05.20-12.05.20	
4	Аналіз та постановка проблеми керування електроспоживанням електрифікованого транспорту	21.09.20-15.10.20	
5	Розрахункові дослідження ефективності використання методів ефективного керування електроспоживання	16.10.20-10.11.20	
6.	Розробка стартап проекту	11.11.20-20.11.20	
7.	Оформлення дисертації	03.12.20-07.12.20	
8.	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	30. 10.20-10.12.20	
9.	Передзахист МД	10.12.20-14.12.20	
10.	Захист дисертації	17.12.20-22.12.20	

Студент

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка 113 сторінок, 40 рисунків, 14 таблиць, 46 використаних джерел.

Метою цієї дисертації є розвиток підходів щодо енергоефективного управління споживанням електричною енергією різними підходами щодо енергоефективності та застосування відновлювальних джерел енергії в метрополітені.

Об'єктом дослідження є режими споживання електричної енергії підземним електрифікованим транспортом

Предметом дослідження є методи та засоби управління електроспоживанням електрифікованого транспорту

Під час роботи було розглянуто особливості роботи та електропостачання підприємства КП «Київський метрополітен». Сформовано основні завдання з енергозбереження метрополітену. Проаналізовано можливість застосування, сильні та слабкі сторони: систем накопичення рекуперативної енергії, використання теплохолодильних установок на базі теплового насосу, впровадження вітрових електричних установок в умовах тунелю метрополітену. Розрахована ефективність цього комплексу підходів, які дозволять зекономити на витратах на електроенергію. Запропоновано ефективне розміщення та ряд сфер застосувань обладнання. Такі технології мають перспективу розвитку в майбутньому, що дозволить підвищити ефективність і доступність таких систем.

Новизною даної системи є застосування моніторингової системи на базі технологій Smart Grid з метою управління електроспоживанням на об'єктах електрифікованого транспорту.

*Ключові слова: електропостачання, метрополітен, енергоефективність, рухомий склад, рекуперація, накопичення енергії, теплові насоси, повітряна установка, вітрова електрична установка, система.*

## ABSTRACT

Explanatory note 113 pages, 40 figures, 14 tables, 46 sources used.

The aim of this dissertation is to develop approaches to energy efficient management of electricity consumption by different approaches to energy efficiency and the use of renewable energy sources in subways.

The object of the study are the modes of electricity consumption by underground electric transport

The subject of the research are methods and means of electric power consumption control of electric transport

During the work the peculiarities of work and power supply of the enterprise KP "Kyiv Metro" were considered. The main tasks for energy saving of the subway are formed. Possibility of application, strengths and weaknesses are analyzed: system of accumulation of regenerative energy, use of heat-cold establishments on the basis of the heat pump, introduction of wind electric establishments in the conditions of the subway tunnel. Increased efficiency of this set of approaches, which will save electricity costs. Efficient accommodation and a range of services for the use of equipment are offered. Such technologies have the prospect of development in the future, which will increase the efficiency and availability of such systems.

The novelty of this system is the use of a monitoring system based on Smart Grid technologies by controlling power consumption at electric transport facilities.

*Key words: power supply, subway, energy efficiency, rolling stock, recuperation, energy storage, heat pumps, air installation, wind electric installation, system.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КП «КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН».....	12
1.1 Вимоги до систем забезпечення метрополітену електричною енергією ..	14
1.2 Опис мереж зовнішнього електропостачання .....	17
1.3 Класифікація та загальна характеристика електроприймачів.....	21
1.4 Загальні завдання з енергозбереження в електрифікованому транспорті.	25
Висновки до розділу .....	28
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАСПОРТУ .....	30
2.1 Аналіз ефективного застосування систем рекуперації електрифікованого транспорту .....	30
2.1.1 Постановка задачі по організації впровадження систем рекуперації електричної енергії.....	30
2.1.2 Загальні питання формування систем рекуперації .....	34
2.1.3 Аналіз існуючих методів щодо визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії.....	38
2.1.4 Порівняльна характеристика потенціалу використання рекуперативної енергії в різних типах електричного транспорту.....	41
2.1.5 Дослідження впливу режимів живлячої мережі .....	43
2.1.6 Дослідження кількісних і якісних показників ефективності рекуперації енергії.....	46
2.1.7 Метод оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту .....	48
2.2 Використання низькопотенціальної теплової енергії в умовах метрополітену.....	53
2.2.1 Досвід інших країн у впровадженні систем перетворення низькопотенціальної теплоти .....	54

2.2.2 Оцінка роботи обладнання та ризику його роботи під час тривалого терміну експлуатації .....	57
2.2.3 Системи кондиціонування та опалення на зворотному циклі Брайтона	60
2.3 Дослідження можливості використання повітряних потоків в тунелі метрополітені.....	63
2.3.1 Оцінка впливу наземного вітрового генератора на оточуюче середовище .....	63
2.3.2 Аналіз можливості впровадження вітроелектро генератору в умовах підземного тунелю .....	64
2.3.3 Дослідження аеродинамічних характеристик вітрового потоку при проходженні рухомого складу в тунелі .....	66
Висновки до розділу .....	69
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЕЛЕКТРИФІКОВАНОМУ ТРАНСПОРТІ .....	71
3.1 Питання енергоефективності шляхом впровадження систем рекуперації енергії.....	71
3.1.1 Результати досліджень з визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача методом мінімальної окупності.....	71
3.1.2 Результати досліджень потенціалу використання енергії рекуперації в метрополітені.....	85
3.2 Технічні рішення з покращенням енергоефективності за допомогою тепло-вентиляційних установок в метрополітені.....	87
3.2.1 Схемні рішення використання теплоти повітря в тунелях метрополітену .....	87
3.2.2 Дослідження ефективності використання тепло-вентиляційних установок в умовах тунелю метрополітену .....	91
3.3 Отримані результати при розробці вирішення оптимізації енергоспоживання шляхом встановлення ВЕУ в тунелі .....	95
3.3.1 Аналіз конструктивних особливостей та вибір обладнання ВЕУ в умовах тунелю метрополітену.....	95

3.3.2 Розрахунок величини потужності ВЕУ в тунелі .....	98
Висновки до розділу .....	101
4 СТАРТАП ПРОЕКТ .....	103
4.1 Опис ідеї проекту .....	103
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	106
ВИСНОВКИ .....	107
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	108



## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

РП – розподільний пристрій

ТП – тягова підстанція (трансформаторна підстанція)

ЕРС – електричний рухомий склад

ПСМ – підземна споруда метрополітену

ВДЕ – відновлювальне джерело енергії

ВЕУ – вітрова електроустановка

ТН – тепловий насос

ПТНУ – повітряна теплонасосна установка

ПХМ – повітряна холодильна машина

ЄНЕ – ємнісний накопичувач енергії

СТЕ – система тягового електропостачання

## ВСТУП

Метрополітен, метро (франц. Métropolitain, буквально - столичний, від грец. Metrópolis - головне місто, столиця), міська позавулична залізниця для масових швидкісних перевезень пасажирів. Метро відрізняється великою пропускною здатністю, регулярністю і високою експлуатаційною швидкістю руху поїздів. Лінії метро можуть бути підземними (в тунелях), наземними і надземними (на естакадах). Розрізняють закритий спосіб будівництва за допомогою тунелепрохідних щитів і відкритий, при якому тунелі і станції будуються в котлованах і після засипаються ґрунтом. Метрополітен забезпечує значну частину пасажирських перевезень сучасних міст.

Закритий спосіб застосовується при будівництві ліній глибокого і мілкового закладення. При цьому всі роботи з будівництва метрополітену ведуть в підземних умовах, без порушення вуличного руху. Відкритий спосіб застосовують при спорудженні ліній метрополітену мілкового закладення (що проходять на глибині 10-15 м від поверхні землі), при цьому всі роботи зі зведення тунельних конструкцій виконують у відкритих котлованах, які після завершення будівництва засипають ґрунтом[1].

Як вид транспорту з величезною провізної здатністю метрополітени мають потужний структурний вплив на місто в цілому. Вони є тим каркасом, навколо якого ведеться житлове будівництво, активізується економічна і соціокультурна діяльність, концентруються інші види міського пасажирського транспорту. У цьому сенсі метрополітени дійсно грають провідну роль при інтеграції транспортної, містобудівної та соціальної політики, що проводиться в містах[2].

**Мета роботи.** Метою роботи є розвиток підходів щодо енергоефективного управління споживанням електричною енергією різними підходами щодо енергоефективності та застосування відновлювальних джерел енергії в метрополітені.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз показників ефективності використання енергії рекуперації в електрифікованому міському транспорті – метрополітені. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність передачі енергії рекуперації в первинну живлячу мережу. Розробка практичних рекомендацій з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

2. На основі аналізу традиційних схем теплопостачання та вентиляції станцій метрополітену, стандартної структури їх технологічного обладнання, а також параметрів і обсягів теплових викидів запропонувати нове схемне рішення для системи теплопостачання підземних споруд метрополітену з використанням повітряних теплонасосних установок. Провести оптимізацію параметрів зворотного циклу Брайтона з урахуванням обмежень пов'язаних з температурними і режимами вологості основної тунельної вентиляції станцій метрополітену.

3. Обґрунтувати доцільність побудови та обрати варіанти конструктивного виконання вітрогенератора, який буде встановлений в тунелі метрополітену, визначивши вітровий потенціал через статистичні дані швидкості вітру.

**Об'єкт досліджень** – режими споживання електричної енергії підземним електрифікованим транспортом

**Предмет досліджень** – методи та засоби управління електроспоживанням електрифікованого транспорту

## **1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КП «КИЇВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН»**

Народження метрополітену, під яким мався на увазі позавуличний рейковий транспорт, який використовує електропривод і працює на відокремленому полотні відноситься до 1890 року, коли перша лінія метро була введена в дію в Лондоні. За минулі з того часу роки побудовано і введено в дію близько 120 метрополітенів, що діють в найбільших містах Європи, Азії та Америки.

В Африці метрополітен діє в Каїрі. В Австралії та Океанії метрополітени відсутні - там, як рейкових видів транспорту, використовуються трамваї і міські залізниці. Але потенціал розвитку метрополітенів ще довго не буде вичерпаний, так як до 2020 р світі буде близько 560 міст з населенням понад 1.5 млн жителів, з них 300 міст, розташованих в Азії.

Всі метрополітени світу перевозили в 2001 р щодня близько 150 млн пасажирів, тобто в 34 рази більше, ніж щоденні перевезення, здійснювані авіаційним транспортом[3].

Вже це одне порівняння показує економічне і соціальне значення будівництва та організації технічної експлуатації систем метрополітенів.

Протягом більш ніж одного століття своєї історії метрополітени пройшли великий шлях докорінних перетворень, і сьогодні вони являють собою втілення новітніх технологій, як з точки зору освоєння найсучасніших промислових інновацій, так і за наданим рівнем обслуговування пасажирів.

Метрополітени спочатку створювалися для того, щоб виключити виникнення заторів в дорожньому русі у великих містах. В даний час вони стали не просто найважливішою частиною міської транспортної системи, а перетворилися в основний структуроутворюючий містобудівний елемент сучасного міста, навколо якого будується вся політика по забезпеченню мобільності населення, а також найважливіший фактор забезпечення високої якості міського життя[2-3].

Метро - екологічно чистий, енергоекономічний і ефективно використовує міську територію від пасажирського транспорту.

Всі транспортні засоби вимагають для свого функціонування енергію і простір для переміщення і стоянки.

Їх функції виходять далеко за рамки перевезення пасажирів, виконуваної окремим видом міського транспорту, і стають потужним інтегруючим фактором, що істотно впливає на підвищення якості життя в місті[3].

Лінії метрополітену утворюють структуровану мережу, навколо якої концентрується житлове будівництво, створюються нові робочі місця, освітні установи, активізується економічна, соціальна та культурна діяльність.

Лінії метрополітену утворюють каркас міської системи громадського пасажирського транспорту, навколо якого повинні розвиватися всі інші види транспорту (наприклад, підземні лінії наземного пасажирського транспорту, майданчики для системи Park and Ride), утворюючи спільно єдину комплексну транспортну мережу міста. Транспортно-пересадочні вузли цієї мережі повинні виконуватися на високому архітектурному рівні і забезпечувати надійний зв'язок окремих видів транспорту між собою.

Будівництво метрополітенів в підземному виконанні і відбувається при цьому реструктуризація транспортної мережі робить надземне міський простір вільним для використання його жителями, що підвищує рівень якості життя в містах[4].

Поряд з інтеграцією транспортних споруд в єдиний комплекс метрополітен забезпечує пасажирів інтегрований підхід в транспортному обслуговуванні і при задоволенні їх інформаційних потреб в процесі поїздки.

Особлива увага в даний час повинна бути звернена на проведення заходів щодо забезпечення на метрополітенах всіх видів безпеки.

Підприємства промисловості, що забезпечують роботу метрополітенів, повинні постійно знаходити найбільш ефективні і відповідають сучасному рівню технічні рішення і здійснювати свою діяльність у тісній взаємодії з транспортними операторами[5].

## **1.1 Вимоги до систем забезпечення метрополітену електричною енергією**

1. Електропостачання споживачів метрополітену здійснюється від енергосистеми міста трифазним змінним струмом частотою 50 Гц, напругою 10 кВ. Робота метрополітену як електричного транспортного комплексу багато в чому залежить від чіткої дії пристроїв електропостачання. Основними вимогами, що пред'являються до системи електропостачання метрополітену, є – безперебійність, надійність, і економічна доцільність.

2. Електроприймачі метрополітену відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) відносяться до першої категорії навантажень, і їх електропостачання повинно бути здійснено від двох незалежних джерел живлення. З метою підвищення надійності електроживлення, підстанції метрополітену підключають безпосередньо до генеруючих джерел і основних (районних) підстанцій енергосистеми лініями 10 кВ без заходу до інших міських споживачів. Незалежними джерелами енергосистеми є дві роздільно діючі секції шин розподільного пристрою (РП) напругою 10 кВ однієї і тієї ж електростанції або районної підстанції.

Підстанції метрополітену, від яких здійснюється живлення силових і освітлювальних навантажень підземних ліній, в нормальному режимі повинні отримувати живлення від двох джерел електроенергії на дві окремі секції шин РП-10 кВ. Ця вимога необхідна для запобігання навіть короткочасної перерви електропостачання таких відповідальних навантажень, як освітлення станцій, вестибюлів і переходів, а також ескалаторів, де зосереджується великий потік пасажирів. Підстанції, від яких проводиться живлення тягових навантажень, можуть отримувати його від одного джерела електроенергії на секцію шин РП-10 кВ при відключеному, але постійно готовим до включення резервного джерела.

3. На метрополітенах управління всіма вимикачами ліній виконують енергодиспетчери за допомогою пристроїв телемеханіки, тому за умовами

експлуатації автоматичного включення резерву (АВР) на вводах підстанції, як правило, не передбачається. Пояснюється це наступними міркуваннями. Всі відповідальні споживачі метрополітену надійно забезпечені безперебійним електропостачанням від двох джерел електроенергії. Тому відключення одного джерела не перериває живлення цих споживачів.

Короткочасна перерва електропостачання тягових пристроїв від однієї підстанції, хоча і небажана, до перебою руху поїздів не призводить, так як живлення тягової мережі триватиме від інших паралельно працюючих підстанцій. Зауважимо також, що незалежно від наявності АВР при знятті і відновленні напруги потрібно по чергове включення випрямних установок, і тому всі операції покладаються на енергодиспетчера.

4. Однією з умов нормальної роботи споживачів метрополітену є стабільний рівень напруги в електропостачальній мережі. Нормами допускаються відхилення напруги в системі 10 кВ в межах  $\pm 5\%$ , які і враховуються в розрахунках. Якщо різниця напруг на тягових підстанціях буде перевищувати нормативні значення, то навантаження підстанцій можуть відрізнятися від розрахункових. Це може призвести до перевантаження окремих підстанцій і навіть виходу їх з ладу. Підвищення напруги в мережі, крім зазначених наслідків, негативно впливає на пристрої освітлення. У підземних спорудах в безперервній роботі знаходиться велика кількість світильників. Підвищення напруги на них призводить до зниження терміну служби ламп. В експлуатації через можливі тривалі відхилення напруги мережі 10 кВ в різних районах енергосистеми здійснюють відповідні перемикання на ансафах трансформаторів. Однак питання про рівень і стабільності напруги в енергопостачальній системі ще залишається актуальним.

З позицій надійності електропостачання розглядаються як нормальні, так і вимушені режими, оцінюється пропускна здатність і потужність основних елементів системи. Цим пояснюється застосування паралельних ліній живлення, секціонування шин 10 кВ, установка резервних пристроїв, а

також запаси по потужності в установках, що розміщуються на підземних підстанціях. Наприклад, на тяговій підстанції передбачається резервний випрямний агрегат, на знижувальних підстанціях кожен з двох трансформаторів освітлювального або силового навантаження розраховують на повну розрахункову потужність. Прагнуть до того, щоб при виникненні вимушеного режиму в системі відбувалося найменше число перемикань, що має сприяти безперебійному електроживленню споживачів.

Для підвищення надійності електропостачання велике значення має система резервування і якість електрообладнання. Очевидно, чим вище якість обладнання, тим вище надійність при одній і тій же мірі резервування. Будівельними нормами і правилами для метрополітенів передбачаються певні показники резервування для тягових і знижувальних підстанцій. За умовами проти-пожежної безпеки на підземних підстанціях слід встановлювати обладнання без масляного заповнення.

Відомо з роботи[6], що найбільш раціональним в системі електропостачання є розміщення джерел енергії в безпосередній близькості до споживачів. Виходячи з цього, знижувальні підстанції метрополітену, від яких живляться нетягові споживачі, розміщують в безпосередній близькості від пасажирських станцій, де зосереджені найбільші навантаження.

Питання про розміщення тягових підстанцій і їх кількості на трасі вирішують на основі техніко-економічних розрахунків. При цьому розглядають кілька можливих варіантів розташування підстанцій і визначають економічні показники: капітальні витрати і експлуатаційні витрати.

Порівняння результатів економічних розрахунків з технічними показниками дозволяє вибрати систему живлення тягової мережі або централізовану (зосереджену), або децентралізовану (розподілену). При централізованій системі застосовують наземні тягові підстанції або або підземні знижувальні підстанції. Лінії живлення (вводи) напругою 10 кВ від джерела енергосистеми підводять до наземної тягової підстанції, від якої електроенергія надходить на знижувальні підстанції. Таким чином, тягові



підстанції є опорними розподільчими пунктами електропостачання метрополітену.

Систему електропостачання тягової мережі вирішують в кожному окремому випадку з урахуванням конкретних умов споруди метрополітену. Наведемо деякі загальні положення, отриманий-ні з практики проектування. Техніко-економічними розрахунками для мереж напругою 825 В визначено оптимальну відстань між наземними тяговими підстанціями при централізованій системі живлення 3,0-3,5 км. З економічної точки зору найчастіше виявляється раціональним застосування централізованої системи для ліній глибокого закладення і наземних ділянок, а децентралізованої - для ліній неглибокого закладення. Однак при спільній оцінці, як з технічних, так і за економічними показниками децентралізована система в більшості випадків виявляється більш доцільною. В Київському метрополітені застосовується децентралізована система електропостачання.

## **1.2 Опис мереж зовнішнього електропостачання**

Підстанції метрополітену поділяють в залежності від призначення на тягові, знижувальні і тягознижувальні (суміщені), а за місцем їх розташування - на наземні і підземні.

На тягових підстанціях здійснюється перетворення трифазного змінного струму напругою 10 кВ, одержуваного від енергосистеми міста, в постійний струм номінальною напругою 825 В для тягової мережі.

На знижувальних підстанціях трифазний змінний струм напругою 10 кВ, що отримується від тягових підстанцій, трансформується в трифазний змінний струм напругою 400 і 230 В для живлення силових і освітлювальних навантажень і пристроїв СЦБ.

Підстанції, на яких поєднуються електротехнічні пристрої для електропостачання тягової і силових мереж, СЦБ і освітлювальних навантажень, називають тягознижувальними підстанціями.

Виконання, кількість і розташування підстанцій визначається на основі техніко-економічних розрахунків системи електропостачання. Нижче розглянуто кілька принципових схем первинного електропостачання для виявлення найбільш доцільних з них для умов метрополітену.

У схемі, представленої на рис. 1.1 кожна живляча лінія від джерела електроенергії А чи Б повинна бути розрахована на все навантаження підстанції Т, так як в роботі знаходиться завжди тільки одна лінія, а друга залишається в резерві.

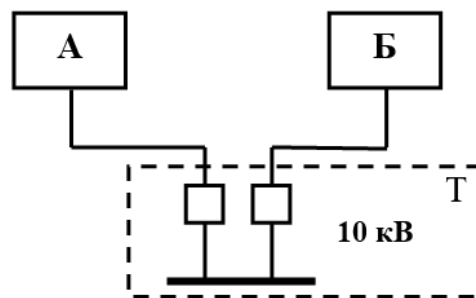


Рисунок 1.1 – Блок-схема способу підключення до підстанції двох незалежних джерел енергії

Якщо є дві підстанції, то може бути два варіанти схеми (рис. 1.2 і 1.3). У першому (рис. 1.2) кожна підстанція отримує живлення по самостійних лініях від двох джерел енергосистеми. При цьому кожна лінія повинна бути розрахована на все навантаження однієї підстанції.

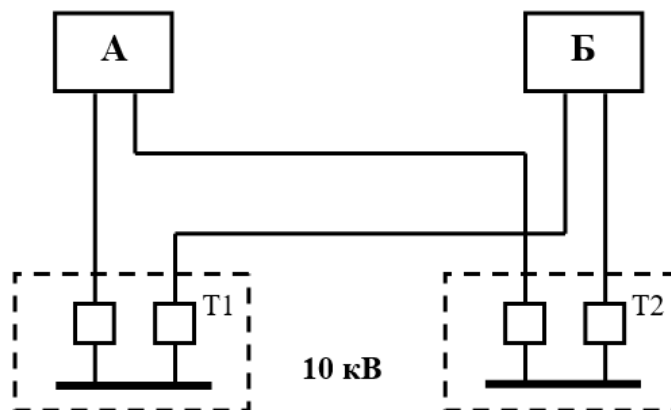


Рисунок 1.2 Блок-схема способу підключення до підстанції двох незалежних джерел енергії

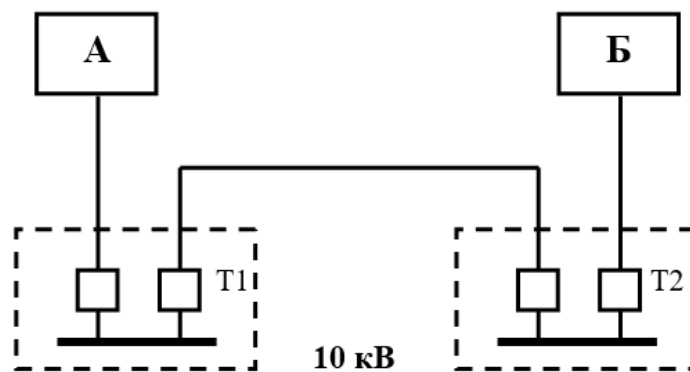


Рисунок 1.3 Блок-схема способу підключення до підстанції двох незалежних джерел енергії

В іншому варіанті (рис. 1.3) кожна підстанція безпосередньо отримує живлення від одного джерела енергосистеми і резервується від другого через кабельну перемичку між підстанціями Т1 і Т2. При цьому живляча лінія кожної підстанції (від джерела електроенергії А чи Б) розраховується на навантаження двох підстанцій, а кабельна перемичка між ними - на навантаження однієї підстанції. Схема з перемичкою в більшості випадків при певному розташуванні джерел енергосистеми по відношенню до підстанцій метрополітену може виявитися більш економічною. Як видно з порівняння варіантів схем, площа перетину кабелів перемички між підстанціями Т1 і Т2 вдвічі менше, ніж площа перерізу кабелів ліній живлення.

Лінія від джерела енергосистеми в схемі (рис. 1.3), як показали розрахунки, може містити два і більше кабелів. Якщо відповідно до розрахунків електропостачання живляча лінія повинна складатися з двох і більше кабелів, доцільно розділити її на дві паралельні одно- або двокабельні лінії. Істотною перевагою даної схеми є те, що вона дозволяє застосувати максимально направлений струмовий захист паралельно працюючих ліній і тим самим запобігти перерві живлення в разі пошкодження однієї з них. Крім того, наявність двох ліній живлення на одній підстанції та кабельної перемички із суміжною підстанцією створює більшу надійність і зручність в оперативній роботі. Ця схема найбільш поширена в системі

електропостачання метрополітенів країни, багаторічний досвід підтвердив її позитивні якості.

Розвиток перетворювальної техніки і перехід на напівпровідникові установки сприяли широкому впровадженню децентралізованої системи живлення. Об'єднання пристроїв тягової і знижувальної підстанції викликало необхідність побудови нових схем первинного електропостачання (рис. 1.4). Таким же чином, в більшості випадків, як показано на рис. 1.4, виконані підстанції на КП «Київський метрополітен».

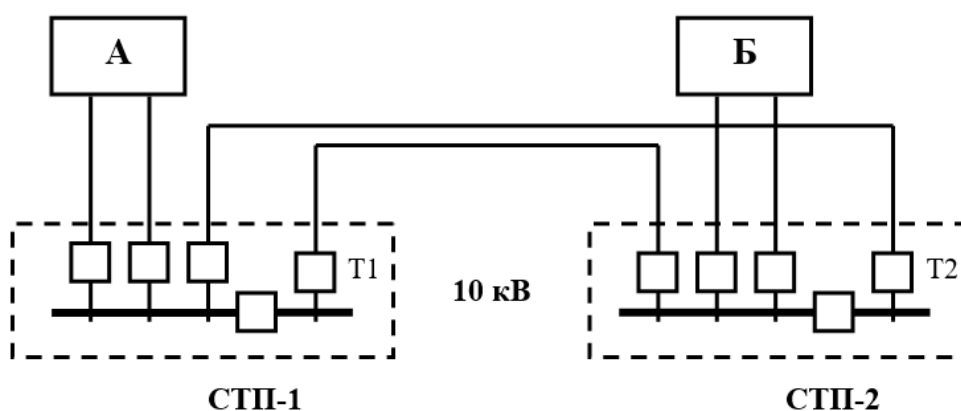


Рисунок 1.4 – Блок-схема способу підключення до підстанції двох незалежних джерел енергії з більш розгорнутим РП

Розподільний пристрій 10 кВ суміщеної тягознижувальної підстанції виконується з двох секцій, які працюють незалежно і одержують живлення від різних джерел енергосистеми. При цьому всі перетворюючі агрегати підключаються до однієї (першої) секції шин РП 10 кВ, живлення якої здійснюється за принципом тягової підстанції. Необхідність підключення перетворювальних агрегатів до однієї секції і, отже, до одного джерела енергосистеми обумовлюється тим, що напруга, що підводиться до двох секціях РП 10 кВ від різних джерел, як правило, має деякі відмінності. Якщо перетворюючі агрегати підключити до різних секціях, які мають різну напругу, то навантаження агрегатів буде не однаковою: один з агрегатів будуть перевантажені, а інші недовантажені.

Таким чином, перші секції шин 10 кВ отримують живлення безпосередньо від джерел енергосистеми А і Б, а другі секції пов'язані з другим джерелом через суміжні підстанції СТП-1 і СТП-2 (рис. 1.4).

У разі виходу з ладу кабельної перемички, підключеної до другої секції з трансформаторами силової та освітлювальної навантажень, включається секційний вимикач, і напруга відновлюється від основного джерела. При пошкодженні однієї з паралельних ліній живлення електропостачання не порушується завдяки наявності спрямованої максимального струмового захисту. Частина, що залишилася в роботі друга лінія забезпечує живлення всіх споживачів з допустимої за нормами перевантаженням кабелів. При виході з ладу одного джерела електроенергії або обох ліній живлення однієї підстанції електропостачання забезпечується від другого джерела через кабельні перемички. В останньому випадку повинен бути включений секційний вимикач на підстанції, де пропала напруга від джерела електроенергії[2-3].

Лінії живлення від джерел енергосистеми розраховуються так, щоб при виході з ладу однієї лінії було забезпечено електропостачання за іншою. При перерві живлення від одного з джерел енергосистеми електропостачання виконується другим джерелом по двох залишилися в роботі вводів і перемичках, кабелі яких мають в цьому випадку допустиму за нормами перевантаження.

### **1.3 Класифікація та загальна характеристика електроприймачів**

Одним з потужних та енергоємних споживачів електроенергії є метрополітен, який має найбільші перевізні можливості порівняно з іншими видами міського транспорту. Слід зазначити, що обсяги перевезень пасажирів метрополітеном та їх частка в міських перевезеннях постійно зростає. З дослідження відомо, що енергоємність перевізного процесу в метрополітенах складає на рівні 80–90 % від загального енергоспоживання галузі. Споживання електроенергії в метрополітені розподіляється таким чином: 70 % – на тягу

рухомого складу; 23 % – на виробничі потреби інфраструктури (освітлення, ескалатори і інше); 5,1 % – на споживачів наземних площадок (експлуатаційні депо, ремонтні бази та майстерні); 1,9 % – інших сторонніх споживачів.

До електропостачання поїздів, машин та механізмів Метрополітену, а особливо щодо його надійності і безперебійності, пред'являються високі вимоги. Вони обумовлені не тільки специфічними умовами метрополітенів як електрифікованих підземних залізниць, а й взаємозв'язком дій всіх пристроїв, призначених для організації руху поїздів і обслуговування пасажирів. Комплекс тягового електропостачання доповнюється пристроями електроживлення нетягових споживачів різного призначення. Кожен вид споживачів впливає на загальний енергетичний баланс лінії метрополітену і обумовлює певні вимоги до вирішення схем електропостачання, електричної захисту, до резервування живлення, автоматизації процесів і відбудові від впливу вимушених режимів[5].

Основними споживачами електроенергії на метрополітенах є:

- електропоїзда;
- ескалатори для спуску і підйому пасажирів на станціях;
- освітлювальні пристрої на станціях, в тунелях і на наземних ділянках;
- вентиляційні установки і пристрої для кондиціонування повітря;
- насосні установки для видалення (відкачування) технологічних і ґрунтових вод з тунелів і станцій;
- пристрої сигналізації, централізації і блокування для організації руху поїздів;
- прилади для електропідігріву повітря і води у службових приміщеннях;
- електрифіковані ремонтні та збиральні машини;
- електротехнічні пристрої різного призначення в депо, на ремонтних заводах і в галузевих майстернях;
- пристрої власних потреб на підстанціях.

Слід зазначити, що споживання електроенергії протягом доби по метрополітену нерівномірно; є два періоди найбільшого сумарного

навантаження, що збігаються з годинами найбільш інтенсивного руху поїздів (ранкові та вечірні години «пік»). На цей же час припадає найбільше навантаження від електроприводів ескалаторів. Режим інших споживачів протягом доби також змінюються, однак без безпосереднього збігу найбільших навантажень з циклічністю графіка руху.

Особливо різко виявляється нерівномірність споживання енергії поїздами. Траси мають так званий гірковий профіль колії. З цієї причини, а також внаслідок того, що поїзд в період пуску набуває порівняно високу швидкість, час споживання енергії для тяги становить 15-20% часу руху по перегону. Іншу частину шляху між станціями поїзд проїде на вибігу і в кінці перегону відбувається гальмування. Зазначені особливості тягового режиму проявляються в тому, що найбільший пусковий струм значно перевищує його середнє значення, віднесене до часу проходження по перегону.

Станція відправлення зазвичай розташовується на майданчику, за якою слідує ухил, а далі в зоні станції прибуття - підйом. Довжина перегонів порівняно не велика і змінюється в межах 0,7-3,5 км.

**Електропривод ескалаторів** – це електромеханічний комплекс, який через передавальний механізм забезпечує дію робочої частини машини, безпосередньо здійснює перевезення пасажирів.

Потужність головного електродвигуна і система приводу визначаються довжиною ескалатора, і залежить від швидкості руху полотна і динамічних пуско-гальмівних характеристик. Живлення ескалаторів від підстанції здійснюється при номінальній напрузі 380 В. Споживання електроенергії ескалаторами становить 3,5-4% загальної її витрати по метрополітену.

**Вентиляційні установки** використовують для підтримки встановлених параметрів повітряного середовища на станціях, в тунелях і в підземних виробничих приміщеннях метрополітену. З декількох способів вентиляції тунелів і станцій найбільш характерною для метрополітену є система з штучним орошуванням і поздовжнім розподілом повітря, що поступає. На перегонах і станціях виконані шахти з вентиляційними установками, які

подають свіжий і витягають відпрацьоване повітря. Для електроприводу використовують асинхронні, короткозамкнені двигуни.

**Насосні установки**, які використовуються для перекачування в міські водостічні магістралі технологічних і ґрунтових вод, які збираються в тунелі і на станціях, автоматизовані. Вони включаються в роботу при заповненні прийомних резервуарів. У зазначені резервуари вода надходить самотливом по лотках і трубах. До подібних споживачам відносяться дрібні санітарно-технічні пристрої на станціях і в виробничих приміщеннях: душові, сушильні шафи, невеликі нагрівальні прилади. Частка санітарно технічних пристроїв, в загальному споживанні електроенергії по метрополітену, становить 9-10%.

Електропостачання вентиляційних і насосних установок виконується від розподільних щитів підстанції напругою 380 В, 220 В.

**Освітлювальні пристрої** на станціях, в тунелях, повинні відповідати вимогам високої надійності технічних засобів з обслуговування пасажирів і забезпечення встановленого виробничого циклу метрополітену. Ці вимоги враховують підземне розміщення переважної більшості станцій, тунелів, переходів, а також виконання наземних приймально-розподільних приміщень для пасажирів з використанням штучного освітлення.

На всьому шляху проходження пасажирів завжди створюється достатня освітленість незалежно від режимів роботи джерел електроенергії. Крім забезпечення безпеки переміщення пасажирів, освітлювальні пристрої відповідають технологічним умовам дії всіх технічних пристроїв і механізмів, створюючи нормальну видимість для руху поїздів і роботи обслуговуючого персоналу. Вони також повинні задовольняти вимогам технічної естетики для станцій і вестибюлів, і відповідати архітектурі споруд.

Живлення мережі освітлення станції та прилеглих до неї ділянок тунелів здійснюється від двох трансформаторів ТО, розташованих на підстанції. Секціонування мережі дає можливість резервування, яке відбувається при перемиканні або автоматично.



Для освітлення підземних приміщень, де перебувають пасажирів або постійно знаходиться обслуговуючий персонал, використовують світильники з люмінесцентними лампами.

**Пристрої сигналізації, централізації і блокування (СЦБ)** представляють собою основну ланку системи управління рухом поїздів і забезпечення його безпеки. Споживання енергії пристроями СЦБ незначно і становить 0,4-0,5% від загальної витрати.

Електропостачання пристроїв СЦБ здійснюється напругою 380 В змінного струму від підстанції. Ремонтні та збиральні машини використовують для роботи на станціях і перегонах[6].

#### **1.4 Загальні завдання з енергозбереження в електрифікованому транспорті**

На даний час актуальною є проблема значного споживання електроенергії рухомим складом під час його експлуатації. У зв'язку з поетапним підвищенням тарифів за спожиту електроенергію подальший розвиток рейкового електрорухомого транспорту, зокрема рухомого складу метрополітену, неможливий без застосування сучасних енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем. Для вирішення зазначеної проблеми в роботі необхідно виконати аналіз заходів і визначити перспективні напрямки з енергозбереження та підвищення енергоефективності на рухомому складі метрополітену[7].

Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зниження енергоемності всіх галузей вітчизняної промисловості. Транспортна система країни займає четверте місце серед споживачів енергоресурсів, де більше 85 % витрат енергії припадає на здійснення перевізного процесу. У собівартості перевезень транспорту з електричною тягою енерговитрати сьогодні оцінюються на рівні 21...23 % і в наслідок подорожчання енергоносіїв мають стійку тенденцію до зростання. Зниження або стримування цього показника вимагає постійного розвитку і вдосконалення енергозберігаючих

технологій відповідно до нових можливостей сучасних технічних засобів та методів управління ними. При інтеграції України у європейський простір це є важливим елементом у реалізації програми ЄС «Пакет дій щодо боротьби зі зміною клімату та використання відновлюваної енергії», що ставить завдання перед європейськими країнами до 2020 р. знизити шкідливі викиди в атмосферу на 21 % порівняно з 1990 р[8].

Основними технологіями енергозбереження в системах електричної тяги на сьогодні є впровадження енергоефективних режимів руху транспорту, вдосконалення конструкції та оптимізація встановленої потужності електрорухомого складу і тягових підстанцій, зниження перетікань потужності і підвищення якості електроенергії в системах тягового електропостачання, впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності, регулювання напруги в тяговій мережі та ін. При цьому одним з важливих резервів зниження енергоємності і покращення екологічних показників електричного транспорту є використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшувати витрати енергії на перевезення в різних видах руху на 10...40 %. Однак внаслідок технологічних особливостей процесів тягового електроспоживання і рекуперації на електрифікованому транспорті сьогодні існує ряд обмежень щодо можливостей повернення і повторного використання відновленої енергії. Це, у свою чергу, є однією з причин незначних обсягів рекуперації енергії, середній показник якої зараз не перевищує 2...3 %[9].

Стратегія модернізації системи електричного транспорту в довгостроковій перспективі передбачає оновлення її інфраструктури та парку рухомого складу, а саме впровадження накопичувачів і багатофункціональних перетворювачів енергії на електрорухомому складі і тягових підстанціях, поступову інтеграцію відновлюваних джерел енергії до систем тягового електропостачання, інтелектуалізацію руху транспортних засобів, інформатизацію взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання

та ін., що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку енергоефективної транспортної системи[2].

Питання енергозбереження на транспорті на сьогоднішній день є важливими і нагальними у всьому світі. Все частіше виникають питання про зменшення споживання палива транспортом, зниження тертя рухомих частин, ефективної організації перевезень людей і вантажів та багато інших. Одночасно з цим, вчені замислюються не тільки про те, яким чином домогтися зниження споживання енергії наземним транспортом, а й тому, як зробити її вироблення більш екологічною і чистою. Повсюдно впроваджуються нові технології по зниженню викидів вуглекислого газу в атмосферу на діючих тепло- і електростанціях, а також в галузі поновлюваних джерел енергії. Енергія сонця, вітру, тепла землі, на відміну від нафти, газу, вугілля є невичерпними, і саме завдяки альтернативній енергетиці людство буде забезпечено теплом і електрикою в майбутньому. Уже сьогодні в багатьох країнах світу впроваджуються програми з відмови від традиційних джерел енергії, завдають шкоди екології нашої планети, на користь зеленої і чистої енергетики[10].

Серед великої кількості цих способів має місце спосіб, що заснований на використанні вітру, як джерела енергії. Тому стоїть завдання розробити пристрій у вигляді вітрогенератору, який буде працювати від повітряних потоків в тунелі і який буде служити додатковим джерелом електричної енергії, що є вельми актуальною і затребуваною задачею[5].

В даний час при проектуванні і будівництві нових станцій метрополітену традиційно передбачено спорудження окремо функціонуючих систем забезпечення мікроклімату (опалення, вентиляції, кондиціонування), що призводить до високого енергоспоживання станцій і завищення в проектах нових станцій вартісних показників цих систем. Тим чином відомо, що експлуатація внутрішнього технологічного обладнання підземних споруд метрополітену (ПСМ) пов'язана з утворенням значних тепловиділень, утилізація яких традиційними методами часто нераціональна через їхню

низьку температурного рівня. Крім того, фактично не використовується тепловий потенціал, що вміщує підземні споруди, ґрунтового масиву ПСМ, яка є досить перспективною сферою діяльності метрополітену. А питання кондиціонування є обов'язковими вимогами для повноцінної роботи підземного електрифікованого транспорту, а то тому може бути вподальшому модернізована.

Внаслідок комбінації електричного приводу з рухомим складом, високою місткістю метрополітен являє з точки зору споживання енергії і необхідних площ найефективніший вид міського пасажирського транспорту.

Крім того, досягнення науково-технічного прогресу дозволяють забезпечити на метрополітенах зворотний повернення енергії при гальмуванні поїзда, що призводить до суттєвої додаткової економії енергії. При своїй роботі метрополітен не виділяє забруднюючих атмосферу вихлопних газів і не створює парникового ефекту. Його негативний вплив на клімат обмежується впливами, зумовленими лише виробництвом електричної енергії. Нарешті, внаслідок того, що в основному всі споруди метрополітенів виконуються в підземному виконанні, міський простір залишається вільним для жителів, що підвищує рівень якості життя в містах[4].

### **Висновки до розділу:**

В розділі дана характеристика та опис особливостей підприємства міського пасажирського електрифікованого транспорту – КП «Київський метрополітен». А саме: загальна характеристика роботи підприємства, особливості його зовнішнього електропостачання, внутрішнього електропостачання, класифікація електроспоживачів в підземних спорудах. Проведений аналіз дозволив підняти питання значного споживання електричної енергії електрифікованим транспортом, проаналізовано перспективні методи енергозбереження в системах електричної тяги, питання кондиціонування та опалення приміщень і відмова від постачання енергії на опалення від електродвигунів, запропоновано скористатися таким джерелом

відновлювальної енергії як вітер, шляхом використання вітрових потоків. Застосування таких енергозберігаючих технологій дозволить заощадити значну кількість витрат на електричну енергію.

Як наслідок, розглянуті питання енергозбереження в умовах метрополітену розкривають електрифікований транспорт як перспективний напрям, який необхідно розвивати і досліджувати, з метою розвитку існуючих і розробкою нових технологій, які так необхідні для забезпечення сталого розвитку.

## **2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАСПОРТУ**

### **2.1 Аналіз ефективного застосування систем рекуперації електрифікованого транспорту**

На даний час актуальною є проблема значного споживання електроенергії рухомим складом під час його експлуатації. У зв'язку з поетапним підвищенням тарифів за спожиту електроенергію подальший розвиток рейкового електрорухомого транспорту, зокрема рухомого складу метрополітену, неможливий без застосування сучасних енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем.

Питання енергозбереження та енергоефективності мають велике народногосподарське значення для економіки України. У зв'язку з постійним поетапним підвищенням тарифів на електроенергію протягом 2017–2020 років проблема енергозбереження та енергоефективності стає стратегічним напрямком розвитку багатьох галузей промисловості. Як наслідок, найближчим часом прогнозується збільшення витрат за споживання електроенергії для підприємств промисловості. Тому дослідження, направлені на покращення енергозбереження та підвищення енергоефективності, є своєчасними та актуальними[11].

#### **2.1.1 Постановка задачі по організації впровадження систем рекуперації електричної енергії**

Теоретичних досліджень за напрямком застосування систем накопичення енергії на залізничному транспорті, зокрема в метрополітенах, чимало. Основні питання, що розглядаються під час цих досліджень такі:

- вибір типу накопичувача та його раціональне розміщення в системі тягового енергозабезпечення;
- визначення раціональних параметрів накопичувача та перетворювача;
- кількісна оцінка збереженої електроенергії за рахунок використання накопичувачів;

- розробка ефективної системи управління енергобмінними процесами, при якій забезпечується мінімізація спожитої електроенергії з контактної мережі[12].

На сьогодні системами накопичення енергії оснащені метрополітени США, Англії, Японії, Франції, Росії, проте в метрополітенах України ці системи не застосовуються. До цього часу особливих потреб у їх застосуванні не було.

Основною причиною, що стримувала впровадження цих систем в метрополітенах України, була відсутність експлуатованого рухомого складу з системами рекуперації. Таким чином, з введенням в експлуатацію рухомого складу з системами рекуперації, впровадження систем накопичення в метрополітенах України стає актуальним[8].

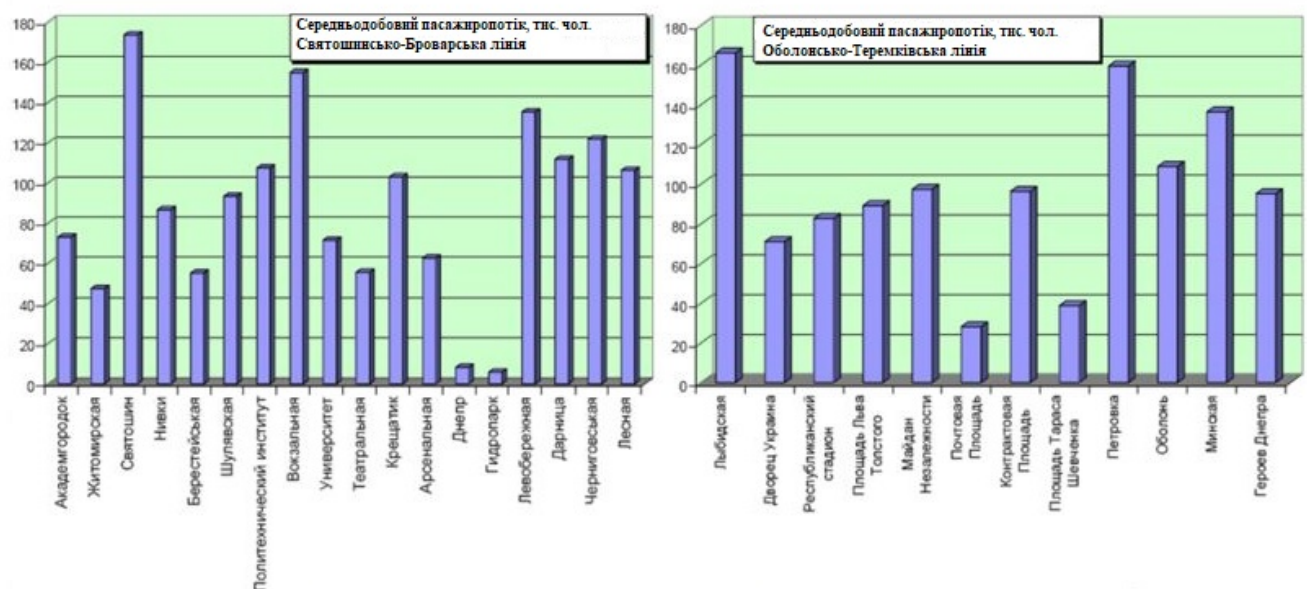


Рисунок 2.1 – Середньодобові пасажиропотоки основних станцій[13]

На сучасному електричному рухомому складі (ЕРС) з плавним регулюванням потужності використання режиму рекуперативного гальмування дозволяє практично виключити з енергетичного балансу складову втрат енергії в гальмах, оскільки здійснення рекуперації на такому ЕРС можливо майже до його зупинки. Транспортні засоби циклічного руху, що працюють на високих швидкостях з короткими відстанями між зупинками,

мають великий резерв кінетичної енергії, використання якої дає значну економію енерговитрат на тягу. Однак для цього в тяговій мережі повинен бути забезпечений гарантований споживач енергії рекуперації[14].

В магістерській дисертації досліджено основні фактори що впливають на ефективність процесу споживання енергії рекуперації в системах електричного транспорту. Серед них є графіки, розміри руху на ділянках та середня швидкість, що формують режими тягового електроспоживання ЕРС, напруга холостого ходу на шинах тягових підстанцій (ТП), схеми живлення контактної мережі, режим системи зовнішнього електропостачання на вводі ТП, наявність накопичувачів енергії, інверторів та регуляторів напруги на ТП. В кінцевому рахунку ці фактори визначають режим напруги на струмоприймачах транспортних засобів при рекуперації, що є випадковим процесом.

На сьогодні розв'язання проблеми використання надлишкової енергії рекуперації в системах електричного транспорту виконується за декількома напрямками (рис. 2.2). Аналіз існуючих методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту дозволив визначити перспективні напрями їх вдосконалення.

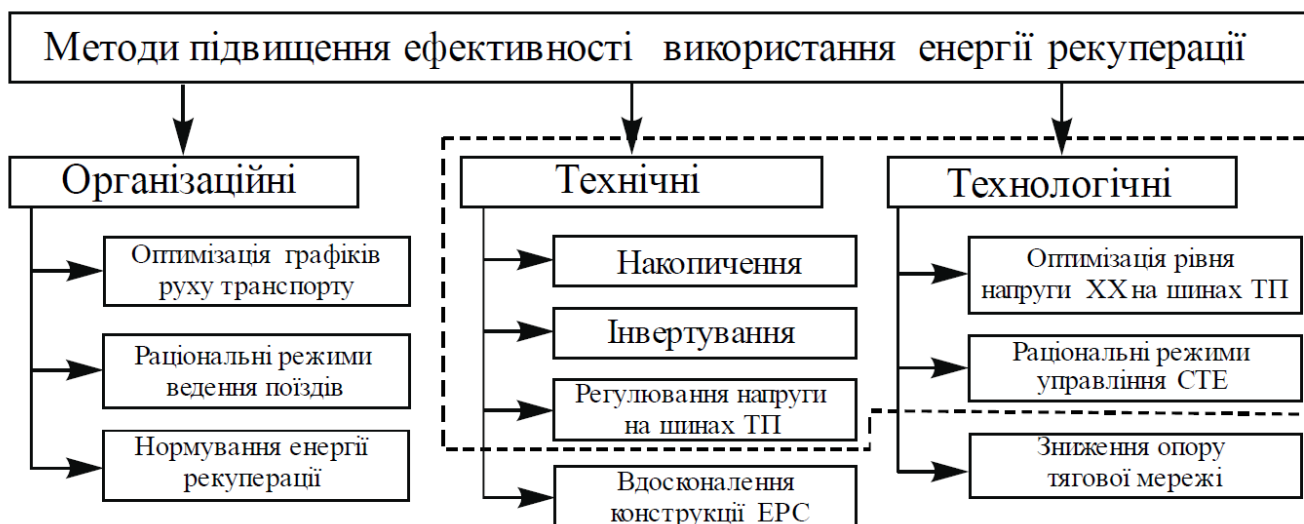


Рисунок 2.2 – Класифікація методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту



Основним організаційним заходом в цьому напрямі, що не потребує капітальних витрат, є оптимізація графіків руху транспорту по критерію споживання енергії рекуперації. Але ефективність заходу є обмеженою і виявляється лише на двоколійних ділянках із затяжними спусками (рис.2.3), коли можливе забезпечення зустрічного руху поїздів на ділянках рекуперації. При відсутності інтелектуальних принципів управління електроспоживанням поїздів регулювання лише їх положень не може гарантовано забезпечити в зоні рекуперації одночасного збігу процесів рекуперації та електроспоживання[8].

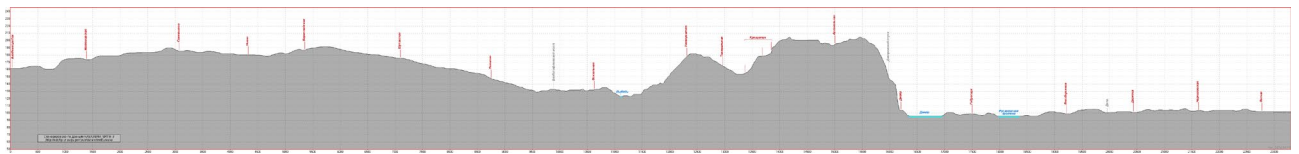


Рисунок 2.3 – План-профіль шляху Святошинсько-Броварської лінії

Використання накопичувачів енергії в системах тягового електропостачання (СТЕ) направлено на вирішення двох протилежних задач, а саме демфуння різко змінних тягових навантажень та поглинання надлишкової енергії рекуперації. В такому разі ефективність роботи накопичувачів суттєво залежить від способу регулювання їх енергообмінних режимів[9].

Технологічні методи дозволяють підвищувати ефективність споживання енергії рекуперації переважно за рахунок оптимізації напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій та зменшення опору тягової мережі, що дозволяє збільшити зону рекуперації, тобто можливість її передачі до віддалених тягових навантажень в межах допустимої напруги на струмоприймачі, але при цьому збільшуються втрати енергії в тяговій мережі.

Нова схемотехніка, перспективи появи сучасного енергозберігаючого електрообладнання в системах тягового електропостачання та smart grid систем керування ним потребує вдосконалення підходів до розв'язання проблеми використання енергії рекуперації та розробки нових методів, на

основі яких буде реалізовано ефективне функціонування силових енергетичних пристроїв. В дисертаційному дослідженні розглядається переважно розвиток і поєднання технічних і технологічних методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації, як найбільш дієвих, що володіють високим енергозберігаючим ефектом. При цьому поєднання декількох методів на основі інтелектуальних алгоритмів управління пристроями може дозволити значно зменшити встановлену потужність потрібного електрообладнання та мінімізувати втрати енергії рекуперації[8].

### **2.1.2 Загальні питання формування систем рекуперації**

Одним з перспективних заходів зниження споживання електроенергії на тягу рухомого складу метрополітену є застосування рекуперативного гальмування. Це вид гальмування дозволяє використовувати значну частину кінетичної енергії рухомого складу метрополітену. До цього часу можливості режиму рекуперації використовуються не в повному обсязі, оскільки значна частина тягового обладнання експлуатованого рухомого складу метрополітену не має можливості генерувати енергію в контактну мережу під час гальмування.

Впровадження систем рекуперації передбачає використання тягового реверсивного перетворювача, вимірювальних датчиків та системи управління. Перетворювач дозволяє регулювати енергообмін між контактною мережею та двигуном в режимах тяги та рекуперативного гальмування. Вимірювальні датчики контролюють значення електричних величин під час енергообмінних процесів. Система управління здійснює рекуперативне гальмування за наявності споживачів в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів за їх відсутності.

З результатів існуючих досліджень відомо, що електроенергія рекуперативного гальмування реалізується далеко не в повному обсязі [6].

Значна частина цієї електроенергії є надлишковою й розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах рухомого складу [7].

За існуючої системи енергозабезпечення українського метрополітену величина використання електроенергії рекуперативного гальмування складає лише 5–10 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу [8]. Але відомо, що існують резерви додаткового енергозбереження на рівні 20–30 % [9, 10].

Для оцінки кількості спожитої електроенергії на тягу та витрат на електроенергію рухомим складом виконано аналіз даних показників в КП «Київський метрополітен» протягом 2017–2020 років. Кількість спожитої електроенергії на тягу рухомим складом метрополітену наведено на рис. 2.4.

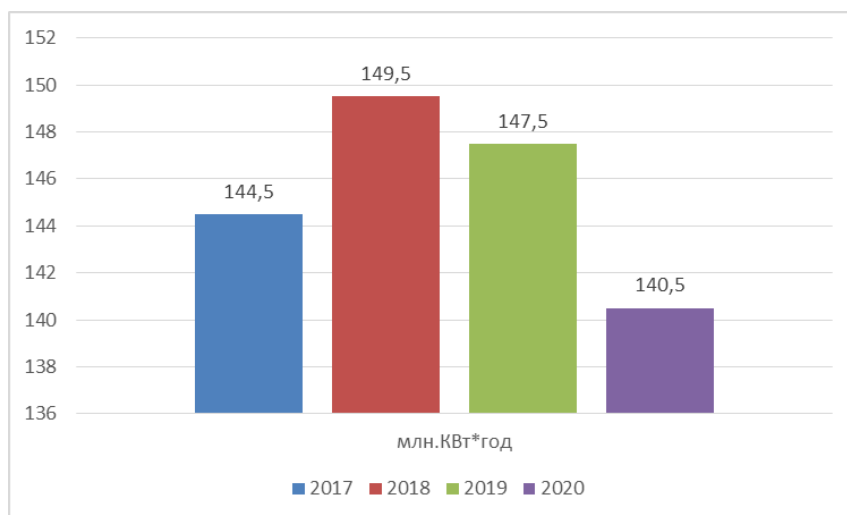


Рисунок 2.4 – Кількість спожитої електроенергії на тягу рухомим складом КП «Київський метрополітен»[12]

Діаграми витрат на електроенергію рухомим складом метрополітену приведені на рис. 2.5

Дослідження виконувались на основі аналізу витрат КП «Київський метрополітен» протягом 2016–2019 років, а також шляхом розрахунку очікуваної зміни даного показника протягом 2017–2020 років, враховуючи поетапне підвищення вартості тарифів. Результати виконаних досліджень у вигляді діаграм наведено на рис. 2.6.

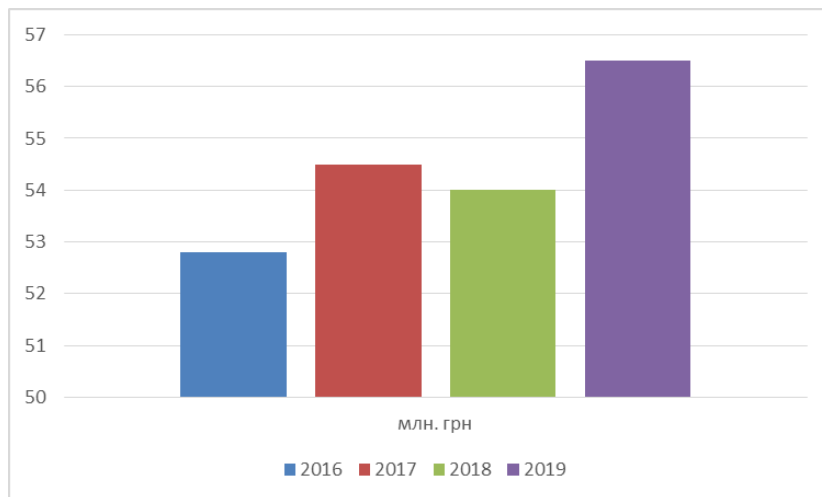


Рисунок 2.5 – Діаграми витрат на електроенергію рухомим складом КП «Київський метрополітен»[12]

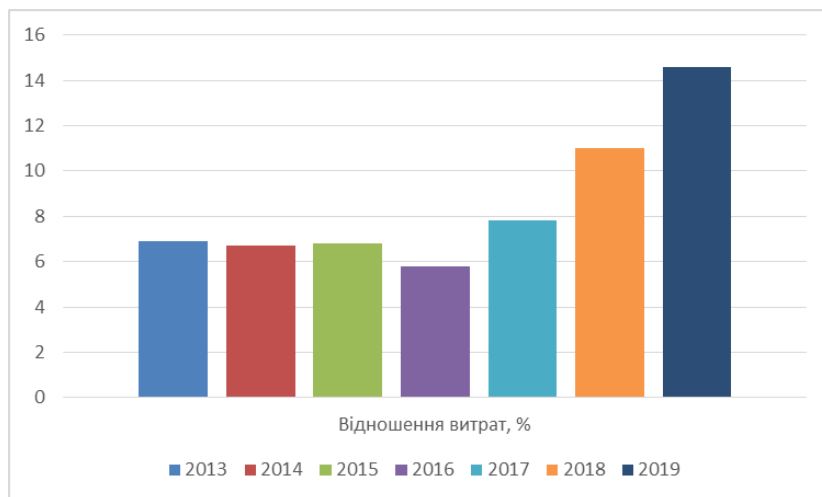


Рисунок 2.6 – Діаграми відношення витрат на електроенергію рухомим складом до загальних витрат КП «Київський метрополітен»[12]

За результатами виконаних досліджень в КП «Київський метрополітен» (див. рис. 2.4-2.6) встановлено, що за останні роки показники кількості спожитої електроенергії та витрат на тягу рухомого складу, а також відношення витрат на електроенергію рухомим складом до загальних витрат практично залишались на одному рівні.

Проте з наведених діаграм (див. рис. 2.6) видно, що відношення витрат на електроенергію рухомим складом до загальних витрат у 2020 році порівняно з 2017 роком збільшаться на 10 %.[12]

Дослідження енергообмінних процесів виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен». Ці дослідження проведено під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації протягом доби. Дослідний рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації. При цьому на поїзді головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні.

Експериментальне дослідження енергетичних процесів під час типових умов експлуатації, проведено з використанням дослідного комплексу, до складу якого входить вищезазначений рухомий склад та вимірювальна система, що встановлена на його борту. Вимірювальна система розроблена для дослідження енергетичних процесів між контактною мережею та поїздом в реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер, аналого-цифровий перетворювач, блок комутації, блок узгодження та вимірювальні датчики. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді[15]. Більш детально та розгорнуто це питання розглянуто в пункті 3.1 магістерської дисертації.

Отже, на даний час існує проблема підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

Одним із перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є впровадження на рухомому складі метрополітену бортових ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) [11–13]. При цьому одним із ключових і недостатньо вивчених питань за умов впровадження бортових ЄНЕ залишається вибір їх раціональних параметрів, в першу чергу, потужності та енергоємності [14].

### 2.1.3 Аналіз існуючих методів щодо визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії

На разі однією з ключових вимог при модернізації існуючого або створенні нового рухомого складу є впровадження на ньому енергоефективних та енергозберігаючих систем з метою заощадження енергоресурсів [11].

При цьому особливої актуальності набувають питання визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії (структурну схему підключення бортового ЄНЕ до тягового електроприводу (рис. 2.7, а) та зовнішній вигляд бортового ЄНЕ (рис. 2.7, б), зображено рис. 2.7) для рухомого складу метрополітену.

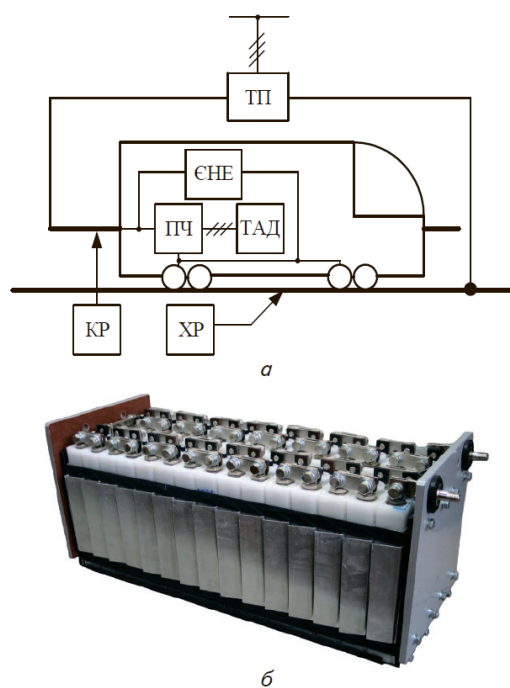


Рисунок 2.7 – Структурна схема підключення бортового ЄНЕ до тягового електроприводу (а) та зовнішній вигляд бортового ЄНЕ (б): ТП – тягова підстанція; ПЧ – перетворювач частоти; ТАД – тяговий асинхронний двигун; КР – контактна рейка; ХД – ходові рейки[11]

В наявних дослідженнях [15, 16] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначати за оцінкою кількості кінетичної енергії рухомого

складу. Суть даного підходу полягає у здійсненні вибору параметрів бортового ЄНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування рухомого складу від швидкості початку гальмування. Така оцінка є досить грубою і не враховує низки чинників, зокрема реальних умов експлуатації рухомого складу метрополітену. До основних з них можна віднести профіль колії, завантаженість, графік руху, сила гальмування, наявність електропневматичного гальмування.

В роботі [17] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначати в режимі обмеження споживання струму тягової мережі. Зазначений підхід базується на визначенні параметрів за характеристиками роботи тягового асинхронного приводу електрорухомого складу. При цьому даний спосіб передбачає використання основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування [18]. Недоліками даного способу оцінки є те, що не враховано профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування.

В праці [19] сформульовано алгоритм розрахунку необхідної енергоємності бортового ЄНЕ для конкретного графіка навантаження. Суть алгоритму полягає у визначенні номінальної потужності та необхідної енергоємності бортового ЄНЕ чисельними методами інтегрування за динамікою споживання електроенергії. Недоліком цього способу є те, що враховано тільки один штатний циклічний режим руху [19]. Однак даний спосіб передбачає врахування реальних умов експлуатації для конкретного графіка навантаження (профілю колії, завантаженості тощо [20]).

В дослідженнях [20, 21] параметри бортового ЄНЕ визначено шляхом використання основних положень теорії імовірності. Основна ідея запропонованого підходу полягає у визначенні параметрів за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування. Зазначена оцінка передбачає побудову гістограм з урахуванням усіх типових умов експлуатації поїзда протягом певного проміжку часу. Недоліком даного підходу є те, що вибір параметрів

виконується на основі запропонованих критеріїв, які не дають змогу обґрунтувати визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ.

Як наслідок, загальним недоліком розглянутих способів і підходів є те, що жоден з них не дозволяє визначати раціональні параметри бортового ЄНЕ. Тому перспективним може бути вибір раціональних параметрів за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення. Під системою накопичення мається на увазі бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач та система, що здійснює керування енергообмінними процесами між ЄНЕ та тяговим електроприводом.

Запропонований підхід складається з наступних 9 етапів:

1. Вибір ділянки експлуатації та моделі рухомого складу метрополітену з системами рекуперації;
2. Визначення типових штатних умов ведення рухомого складу на заданій ділянці колії;
3. Експериментальне дослідження енергетичних процесів під час типових умов ведення рухомого складу метрополітену за графіком;
4. Обробка отриманих масивів даних та визначення діапазону зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування;
5. Вибір бортових ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоемності, які знаходяться в діапазоні зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу;
6. Визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням експлуатаційних витрат на їх обслуговування;
7. Дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження на рухомому складі обраних систем накопичення;
8. Побудова характеристики терміну окупності систем накопичення в залежності від робочої потужності та енергоемності бортових ЄНЕ;
9. Визначення раціональної потужності та енергоемності ЄНЕ за результатами аналізу вищезазначеної характеристики.



Таким чином, суть даного підходу полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ за аналізом характеристики терміну окупності систем накопичення. Далі з застосуванням цього підходу розглянемо визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для конкретних заданих умов експлуатації рухомого складу[11].

#### **2.1.4 Порівняльна характеристика потенціалу використання рекуперативної енергії в різних типах електричного транспорту**

Рекуперация енергії з дослідження[8] в загальному випадку представляє собою випадковий процес, що залежить від режиму гальмування та напруги на струмоприймачі транспортного засобу, що являє собою при цьому рухоме джерело енергії, споживаної тяговою мережею. Кількість енергії, що виробляється при рекуперативному гальмуванні залежить від ряду параметрів та визначається виразом(2.1):

$$W_P = (0,01073Q(1+g)(v_{\Pi}^2 - v_K^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{EKB})S)h_P \quad (2.1)$$

де  $Q$  – маса поїзда;

$(1+g)$  – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда;

$v_{\Pi}$ ,  $v_K$  – швидкість відповідно початку і кінця гальмування;

$w_0$  – основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування;

$i_{EKB}$  – еквівалентний ухил на ділянці гальмування;

$S$  – довжина гальмівного шляху;

$\eta_P$  – ККД ЕРС в режимі рекуперації.

Особливістю процесу рекуперації є його залежність від режиму напруги в тяговій мережі, тому в умовах експлуатації найчастіше реалізується енергія  $A'_P < A_P$ . При цьому частина енергії, що не може бути прийнята тяговою мережею є надлишковою енергією рекуперації  $A_{\text{надл.Р}} = A_P - A'_P$ , яка в різних

видах руху сягає 30...100 % від значення (2.1), що особливо проявляється при малих розмірах руху на ділянках.

Режим рекуперації в системі електричної тяги потребує наявності гарантованого споживача виробленої енергії, при відсутності якого підвищується напруга на струмоприймачі рекуперативного ЕРС і в тяговій мережі (рис. 2.8). При досягненні верхньої границі напруги на струмоприймачі (рис. 2.9, а) відбувається «зрив» рекуперації і перехід ЕРС на реостатне або механічне гальмування, при яких енергія рекуперації утилізується в гальмах[8].

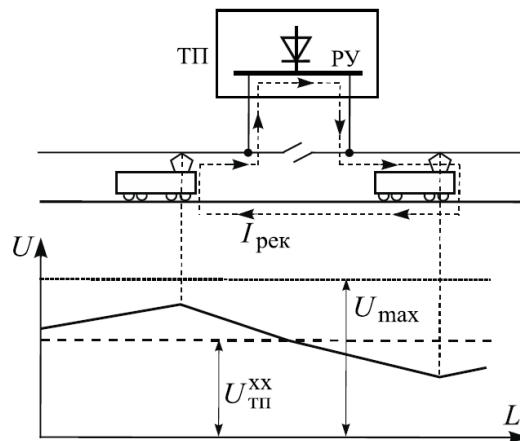


Рисунок 2.8 – Режим напруги в тяговій мережі при наявності на ділянці рекуперації[8]

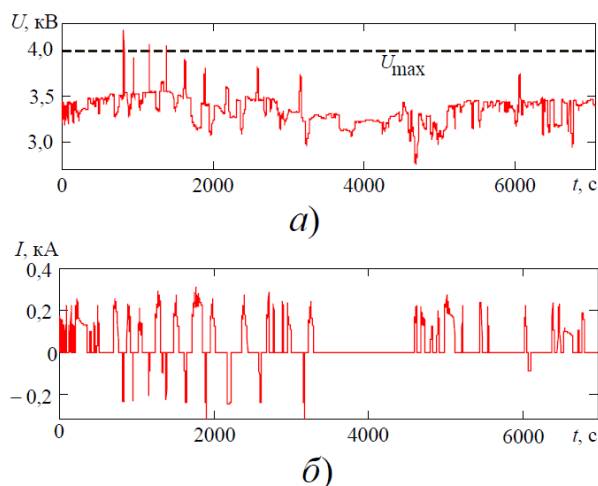


Рисунок 2.9 – Часові діаграми напруги на струмоприймачі (а) і тягового струму (б) вагону електропоїзду ЕПЛ2Т[8]

Основні імовірнісні характеристики режиму напруги на струмоприймачах ЕРС постійного струму при рекуперації в різних видах руху наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Імовірнісні характеристики напруги на струмоприймачі в режимі рекуперації

Вид транспортного засобу	Параметри					
	$m_U$ , В	$\sigma_U$ , В	$Mo_U$ , В	$Me_U$ , В	$As_U$ , відн.од.	$Ex_U$ , відн.од.
Вантажні електровози	3682	286	3589	3756	0,34	1,31
Електропоїзди ЕПЛ2Т	3769	364	3697	3582	– 0,25	0,96
Трамваї ТЗД	782	68	752	746	0,16	– 1,87

Дослідження режиму напруги на струмоприймачах і в тяговій мережі при рекуперації дозволило врахувати його вплив на ефективність процесу в різних умовах, а також визначити вплив рівня напруги на шинах тягових підстанцій на втрати енергії рекуперації[9].

### 2.1.5 Дослідження впливу режимів живлячої мережі

При наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі поліпшується за рахунок передачі енергії рекуперації в мережу середньої (високої) напруги змінного струму за умови, що її прийом узгоджений як в технічному так і комерційному аспектах, а саме за максимально допустимою короткочасною потужністю, що приймається живлячою мережею, прийнятним рівнем гармонік та готовністю енергопостачальної компанії до рефінансування.

Використання інверторів на ТП постійного струму поширено лише на деяких гірських ділянках Львівської залізниці з затяжними ухилами (до 30 %). На даних ділянках надлишкова енергія рекуперації передається з тягової мережі постійного струму 3,3 кВ до живлячої мережі змінного струму 10 (35, 110) кВ. Вмикання інверторів відбувається при зростанні напруги на шинах ТП до 3550...3600 В[8].

Для аналізу ефективності роботи інверторів на ділянці Львівської залізниці з ухилом 28,4 ‰ були проведені синхронізовані вимірювання параметрів енергії рекуперації на стороні постійного і змінного струмів двох суміжних ТП і поїзді в режимі рекуперації, що рухався між ними (рис. 2.10).

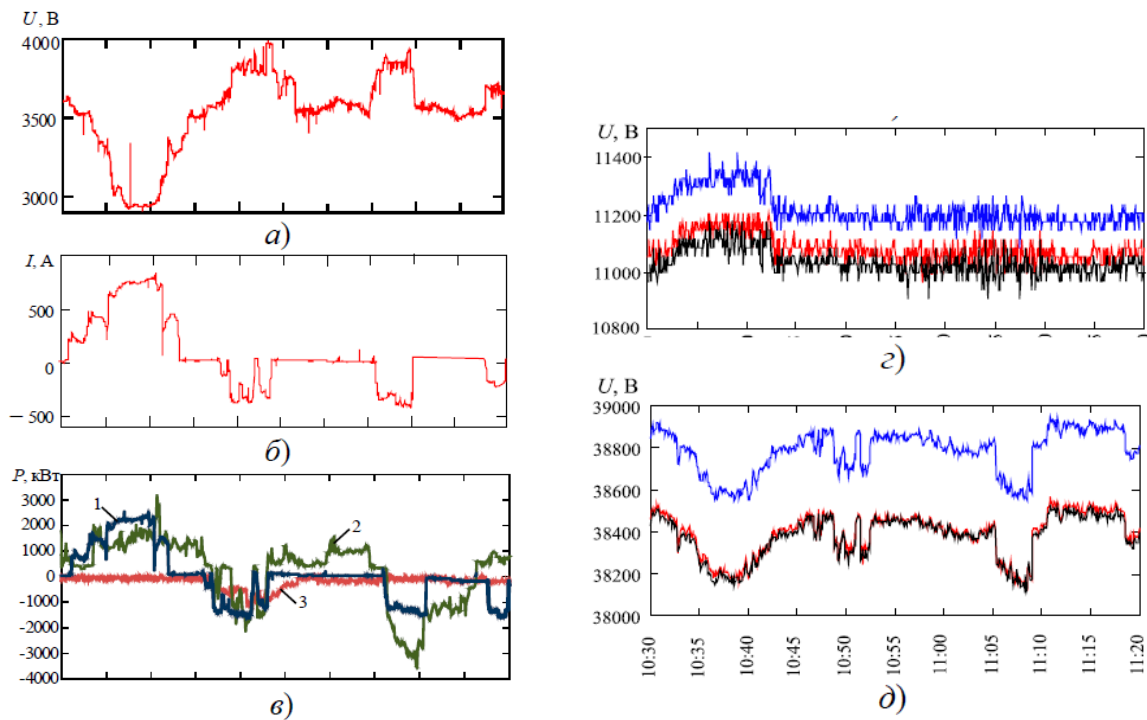


Рисунок 2.10 – Вплив режиму живлячої мережі на процес рекуперації:  
*а, б* – напруга на струмоприймачі і струм ЕРС; *в* – потужності ЕРС і ТП (1 – ЕРС; 2 – ТП «В»; 3 – ТП «С»); *г, д* – лінійні напруги на вводах ТП «С» (10 кВ) і «В» (35 кВ)[8]

Встановлено, що при цьому мав місце нерівномірний розподіл потужності рекуперації по відповідним ТП. Зокрема спостерігалася передача 75...80 % енергії рекуперації через віддалену ТП «В», що знаходилася на відстані до електровоза близько 90 % довжини міжпідстанційної зони. Вплив на режим роботи інверторів при цьому здійснювали живлячі мережі. Зафіксовано, що на даних ділянках при рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення 3,95 кВ, при якому відбувалося вимикання однієї секції електровозу з режиму рекуперації.

Крім того було зафіксовані випадки, коли сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації

поїзда (рис. 2.10, в), що пояснюється перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки[8].

Важливим показником ефективності роботи інверторів на ТП є селективність їх вмикання при наявності надлишкової рекуперації на ділянках. Система управління вмиканням інвертора повинна ідентифікувати підвищення напруги на шинах ТП швидше ніж спрацює реле максимальної напруги на ЕРС і ввімкне реостатне гальмування. В якості параметру ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі запропоновано використовувати похідну напруги на шинах ТП, яка може бути визначена за стрибком напруги на струмоприймачі ЕРС на фідерній зоні[2,8,9]. Встановлені граничні діапазони похідної напруги на струмоприймачах ЕРС з контактною системою регулювання в комутаційних режимах (скидання тяги) та при ввімкненні рекуперації, що наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Статистичні характеристики стрибків напруги на струмоприймачах ЕРС

Система електричної тяги	$U_{\text{ном}},$ В	Комутаційний режим		Режим рекуперації	
		$m_{dU/dt},$ В/с	$\sigma_{dU/dt},$ В/с	$m_{dU/dt},$ В/с	$\sigma_{dU/dt},$ В/с
Магістральні залізниці	3000	1520	320	395,4	126,3
Метрополітен	750	1453	246	412,5	91,4

З табл. 2.2 видно, що похідна напруги на струмоприймачі при комутаційних процесах в 3...4 рази перевищує її значення в режимі рекуперації на ненавантажену тягову мережу. З аналогічною швидкістю але у меншому діапазоні змінюється напруга на шинах тягової підстанції. Ця особливість дозволяє вибудовувати систему ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі і використовувати цю ознаку для забезпечення своєчасного спрацювання інверторів (накопичувачів) або регуляторів напруги на шинах постійного струму ТП раніше моменту спрацювання захисту на

транспортному засобі за максимальною напругою і перемикання його на реостатне гальмування[11].

### 2.1.6 Дослідження кількісних і якісних показників ефективності рекуперації енергії

В якості кількісного показника процесу рекуперації використано коефіцієнт відновлення (рекуперації), що є відношенням витрати енергії на тягу (з урахуванням витрат на власні потреби поїзду) до генерованої енергії при електричному гальмуванні[8]:

$$k_p = \frac{W_p}{W_T} = \sum_{i=1}^n \int_{t_{\Pi i}}^{t_{Ki}} U(t) I_p(t) dt \Bigg/ \int_0^T U(t) I_T(t) dt, \quad (2.2)$$

де  $U(t)$  – напруга на струмоприймачі ЕРС;

$I_p(t)$ ,  $I_T(t)$  – відповідно струми в режимі рекуперації і тяги;

$t_{Ki}$ ,  $t_{\Pi i}$  – відповідно моменти початку та закінчення рекуперативного гальмування;

$n$  – кількість актів рекуперативного гальмування.

Для ділянок Придніпровської залізниці з інтенсивним рухом коефіцієнт рекуперації приміських поїздів в середньому становить 0,21 та розподілений за нормальним законом (рис. 2.11).

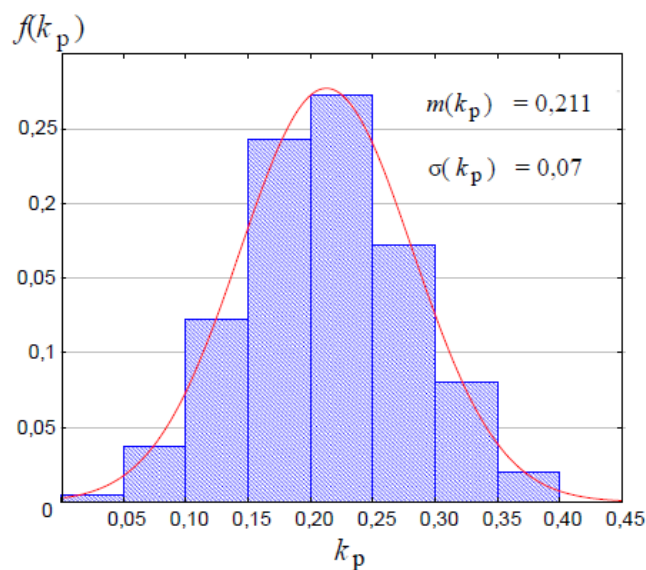


Рисунок 2.11 – Статистичний розподіл коефіцієнта рекуперації в приміському русі[8]

На основі множини реалізацій потужності ЕРС  $\{P_n(t)\}$  було виконано розвиток наряду використання інтегральних показників (табл.2.3) графіків рекуперації енергії, що кількісно характеризують якісний рівень енергії рекуперації з точки зору ефективності її споживання, в тому числі, стабілізованими енергосистемами (живлячою мережею) та оцінені їх чисельні значення для деяких систем електротранспорту (табл.2.4).

Таблиця 2.3 – Інтегральні показники графіків рекуперації енергії

№ п/п	Назва	Аналітичний вираз
1	Коефіцієнт мінімуму енергії рекуперації	$\beta = P_{\min} / P_{\max}$
2	Пік-фактор (середньо-інтегральний коефіцієнт максимуму енергії рекуперації)	$\Pi = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cp}}} = P_{\max} \left/ \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right.$
3	Коефіцієнт заповнення або густина енергії рекуперації	$\gamma = \frac{P_{\text{cp}}}{P_{\max}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \left/ P_{\max} \right.$
4	Тривалість максимально-стабільної рекуперації енергії	$t_{\text{cp max}} = \int_0^T P(t) dt \left/ P_{\max} = \gamma T \right.$
5	Діапазон коливання потужності рекуперації	$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$
6	Коефіцієнт форми потужності рекуперації	$k_{\Phi} = \frac{P}{P_{\text{cp}}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} \left/ \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right.$
7	Коефіцієнт коливання потужності рекуперації	$k_{\kappa} = \int_0^T  P(t) - P_{\text{cp}}  dt \left/ \int_0^T P(t) dt \right.$

В приведених виразах  $P_{\min}$  ,  $P_{\max}$  ,  $P_{\text{cp}}$  ,  $P(t)$  – відповідно мінімальна, максимальна, середня та миттєва потужності рекуперації ЕРС;  $T$  – тривалість процесу рекуперації енергії.

Таблиця 2.4 – Діапазон чисельних значень якісних показників графіків рекуперації енергії

№ п/п	Тип ЕРС	$\beta$	$\Pi$	$\gamma$	$T_{\text{cp max}}$ , с	$\Delta P$ , МВт	$k_{\Phi}$	$k_{\kappa}$
1	Електровози	2,1-4,2	1,4-7,52	0,11-0,8	35-257	0,9-2,4	1,2-3,7	0,2-0,4
2	Метрополітен	4,1-5,6	3,2-8,6	0,3-1,16	4,7-8,4	0,5-1,5	2,1-2,8	0,5-0,7
3	Трамваї	5,6-7,2	1,2-7,1	0,7-2,4	2,1-5,3	0,1-0,3	1,9-5,1	0,3-0,8

З аналізу даних табл. 2.4 видно, що генерована ЕРС при рекуперації енергія характеризується значною нерівномірністю в часі, а її показники змінюються в широкому діапазоні і носять імовірнісний характер. Величина коефіцієнта коливання  $k_k$  вказує на те, що енергія рекуперації володіє змінною складовою на рівні 50...70 % (для метрополітенів) від повної енергії рекуперації, а значення коефіцієнта форми  $k_f$  свідчить про збільшений в 2,1...2,8 разів рівень втрат рекуперативної енергії в опорі тяговій мережі (для трамваїв) над мінімально можливими втратами при стабілізованій генерації. Величина  $t_{cp \max}$  дозволяє судити про тривалість кидків напруги, що будуть внесені в живлячу мережу при передачі до неї енергії рекуперації[12].

Відмінність розглянутих показників від оптимальних значень потребує їх врахування при розробці технологій щодо підвищення ефективності використання енергії рекуперації, та є важливим фактором при обґрунтуванні технічних рішень щодо її повернення до систем зовнішнього електропостачання шляхом інвертування на тягових підстанціях та при розробці алгоритмів сумісної роботи інверторів і накопичувачів, що забезпечать стабілізацію вихідної потужності інверторів при роботі на живлячу мережу[8].

### 2.1.7 Метод оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту

Потенціал енергозбереження визначається або для окремого  $i$ -го енергозберігаючого заходу в  $k$ -му ( $k \in K$ ) елементі (об'єкті) розглядуваної системи, або для множин таких заходів  $i \in I$ . Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні, так і у відносних одиницях[8]:

$$\Pi_{KI} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}, \quad \Pi_{KI} = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B T_{k_i})}, \quad (2.3)$$



де  $\Pi_{KI}, \pi_{KI}$  – відповідно абсолютний і відносний потенціали

енергозбереження;

$W_{k_i}^B, W_{k_i}^P$  – витрата електроенергії на тягу відповідно до і після реалізації енергозберігаючих заходів;

$T_{k_i}$  – період часу, для якого розраховується зниження витрат енергії при відповідному енергозберігаючому заході.

Теоретичним (граничним) потенціалом енергозбереження при використанні рекуперації енергії в абсолютних одиницях є величина енергії, що визначається виразом (2.1)[8, 12]. У відносних одиницях це буде виражати теоретичний коефіцієнт рекуперації  $k_P^{\text{теор}}$ , що визначається за виразом (2.4)[8]. Величина  $k_P^{\text{теор}}$  залежно від експлуатаційних показників ділянок зі шкідливими спусками може бути виражена як:

$$k_P^{\text{теор}} = \frac{\Gamma_2 i_{\text{екв}} - w_0}{\Gamma_1 i_{\text{екв}} + w_0} \eta_P \gamma_P, \quad (2.4)$$

де  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – річні вантажопотоки відповідно в бік підйому і спуску, млн т/рік;  
 $\gamma_P$  – частка гальмівної сили рекуперації в загальній гальмівній силі поїзда при додатковому пригальмовуванні механічними гальмами.

При циклічному русі енергетичну ефективність рекуперації на ділянках з легким і середнім профілем доцільно розглядати як:

$$k_P^{\text{теор}} = \left( 1 - \frac{v_K^2}{v_{\Pi}^2} \right) \eta_P. \quad (2.5)$$

Енергія рекуперації, що реалізується в умовах експлуатації в більшості випадків менше теоретичного потенціалу енергозбереження  $\Pi^{\text{теор}} = W_P$  і за наявності існуючого енергозберігаючого обладнання, є технічно-реалізованим потенціалом енергозбереження та дорівнює:

$$\Pi^{\text{тех}} = W'_P = W_P k_{\text{СП}} \quad (2.6)$$

де  $k_{\text{СП}} \in [0, 1]$  – коефіцієнт споживання енергії рекуперації.

Величина  $k_{\text{СП}}$  при відсутності на ТП пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації залежить переважно від розмірів руху на ділянці і напруги на шинах ТП та являє собою випадкову величину. Для транспортного засобу в режимі рекуперації величина  $k_{\text{СП}}$  визначає рівень напруги його на струмоприймачі[8], тобто

$$k_{\text{СП}}(U) = \begin{cases} 1, & \text{при } U < U^{\max}, 0 < I_P \leq I_T, \\ 0, & \text{при } U < U^{\max}, I_T = 0. \end{cases} \quad (2.7)$$

Проміжні значення величини в зазначеному діапазоні відповідають випадку з обмеженим тяговим електроспоживанням в зоні рекуперації, коли має місце надлишковий струм (енергія) рекуперації  $k_{\text{СП}}$

$$\begin{aligned} I_{\text{надл.Р}} &= (I_P - I_T) > 0, \\ W_{\text{надл.Р}} &= \Pi^{\text{теор}} - \Pi^{\text{тех}} = \Pi^{\text{теор}}(1 - k_{\text{СП}}). \end{aligned} \quad (2.8)$$

Таким чином, реалізація потенціалу енергозбереження при використанні процесу рекуперації енергії безпосередньо пов'язана з величиною  $k_{\text{СП}}$ , яка, власне, і формує енергозберігаючий ефект від процесу відновлення енергії в системах електрифікованого транспорту.

Наявність в СТЕ пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації, наприклад інверторів, як показали дослідження, не забезпечує гарантовано  $k_{\text{СП}} = 1$ , оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії  $W_{\text{надл. Р}}$  залежить від рівня напруги на вводі ТП. Це вимагає розробки комплексного підходу до застосування існуючих заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації[8, 11].

В розділі досліджено залежність величини  $k_{\text{СП}}$  від основних експлуатаційних та режимних параметрів систем тягового електропостачання (в тому числі при використанні сучасного і перспективного енергозберігаючого обладнання), де  $k_{\text{СП}}$  розглядався як функція багатьох змінних вигляду:

$$k_{\text{СП}} = f(U_{\text{ТП12}}, U_{\text{ВХ}}, E, R_{\text{ТМ}}, N, P_{\text{Т}}, x_{\text{Р}}, x_{\text{Т}}, v_{\text{ср}}), \quad (2.9)$$

де  $U_{\text{ТП12}}$  – середня напруга холостого ходу на шинах двох граничних ТП;

$U_{\text{вх}}$  – напруга на вводах ТП;

$E$  – поточний рівень заряду накопичувачів;

$R_{\text{тм}}$  – опір тягової мережі;

$N$  – розміри руху на ділянці;

$P_{\text{т}}$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;

$x_{\text{р}}, x_{\text{т}}$  – відповідно координати поїздів в режимі рекуперації і тяги;

$v_{\text{ср}}$  – середня швидкість руху на ділянці.

В якості енергозберігаючих заходів щодо підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системі електричної тяги розглянуто варіанти використання регулювання графіків руху поїздів, встановлення на ТП окремо накопичувачів енергії, інверторів та регуляторів напруги[8]. Для розрахунків були використано розроблені моделі СТЕ при заданих експлуатаційних показниках ділянок, в результаті чого були отримані статистичні характеристики величини  $k_{\text{СП}}$ , що наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Основні статистичні характеристики коефіцієнта  $k_{\text{СП}}$

№	Енергозберігаюча технологія	$k_{\text{СП}}^{\min} \dots k_{\text{СП}}^{\max}$	$m_{k_{\text{СП}}}$	$\sigma_{k_{\text{СП}}}$
1	Оптимізація графіків руху	0,42...0,56	0,47	0,11
2	Використання інверторів на ТП	0,71...0,95	0,78	0,85
3	Використання накопичувачів на ТП	0,69...0,84	0,71	0,12
4	Використання регуляторів напруги	0,61...0,73	0,68	0,09
5	Одночасне використання п. 2, 3, 4	0,97...1,0	0,98	0,08

З табл. 2.5 видно, що при сумісному використанні інверторів, накопичувачів і регуляторів напруги та методів нейро-нечіткого управління їх режимами має місце практично повне використання енергії рекуперації (

$k_{\text{СП}} \rightarrow 1$ ). В даному випадку також досягається зниження встановленої потужності розглянутого енергозберігаючого обладнання.

На практиці важливе значення має економічно-доцільний потенціал енергозбереження[8]. Граничною умовою економічної доцільності реалізації енергозберігаючого заходу є рівність додаткових витрат (інвестиційних, експлуатаційних та ін.) за життєвий цикл його реалізації, пов'язаних з впровадженням заходу  $Z_{ki}$  і сумарної вартості зекономлених енергоресурсів, що формалізується у вигляді:

$$A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000} + \frac{U_{\text{сер.Р}} \cdot I_{\text{сер.Р}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (2.10)$$

$$p(t) = u(t) \cdot i(t).$$

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} \rightarrow P_{\text{max}}.$$

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}, \quad (2.11)$$

$$\eta_{\text{тяги}} = \eta_{\text{СНЕ}} \cdot \eta_{\text{РП}}^2 \cdot \eta_{\text{ТП}} \cdot \eta_{\text{РЕК}} \quad (2.12)$$

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (2.13)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що визначає завантаження тягової мережі, нерівномірність електроспоживання та ін.;

$S_{\text{ТП}}^{\text{fact}}, S^{\text{fact}}$  – відповідно оптимальна та фактична схеми живлення.

У роботі [8] також було виконано експериментальну оцінку теоретичного потенціалу енергозбереження при використанні рекуперації енергії в умовах Дніпровського метрополітену. Для цього застосовано експериментально отримані в роботі реалізації потужності (рис. 2.12) та визначені відповідні їм коефіцієнти рекуперації для руху електропоїздів 81.717(714).5М.

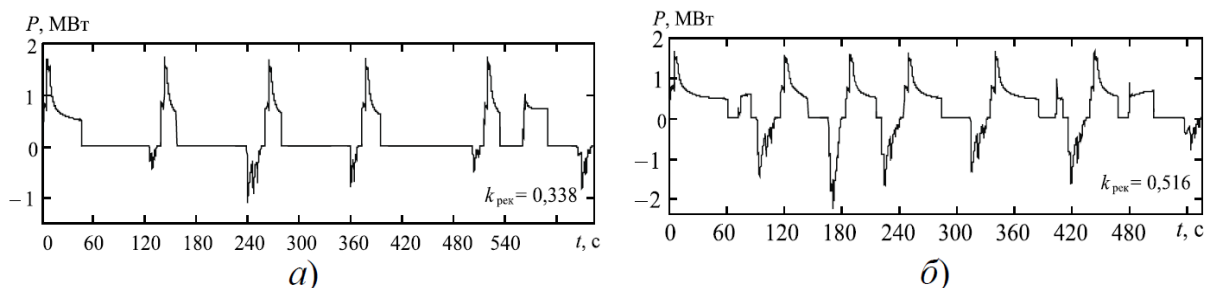


Рисунок 2.12 – Часові діаграми тягового електроспоживання поїзда метрополітену 81.717(714).5М при русі за режимною картою (а) та в прискореному режимі (б) [8]

Оцінка потенціалу рекуперації була виконана за енергію, генерованою електропоїздами при реостатному гальмуванні[4, 8]. Результати розрахунків відповідають значенню теоретичного потенціалу енергозбереження в метрополітені при використанні рекуперації енергії та наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Показники електроспоживання і рекуперації електроенергії в метрополітені

Напря́м	Режим руху							
	За режимною картою				Прискорений			
	$W_T$ , кВт·год	$W_P$ , кВт·год	$k_P$	$v_{cp}$ , км/год	$W_T$ , кВт·год	$W_P$ , кВт·год	$k_P$	$v_{cp}$ , км/год
В-К	36,52	5,25	0,144	40	56,12	18,95	0,338	46
К-В	26,44	10,15	0,384	36	43,15	22,27	0,516	45

Наведені дослідження в черговий раз підтверджують, що впровадження систем рекуперації енергії в умовах метрополітену являє собою перспективний та ефективний напрям з метою заощадження витрат на електричну енергію[8].

## 2.2 Використання низькопотенціальної теплової енергії в умовах метрополітену

Єдиним на сьогоднішній день засобом, здатним раціонально використовувати ресурс скидної теплоти тунельної вентиляції і

технологічного обладнання станцій метрополітену, перетворюючи її в теплоту придатну для теплопостачання, є теплонасосні установки (ТНУ). Впровадження в системи забезпечення мікроклімату ПСМ ТНУ дозволить ефективно поєднувати функції систем кондиціонування і опалення, забезпечивши при цьому зниження обсягів централізованого теплопостачання для проєктованих станцій[22].

Створення таких альтернативних систем потребує чималих капітальних витрат, тому їх доцільність повинна технічно і економічно обґрунтовувати з урахуванням цілого ряду факторів (кліматичних умов, архітектурно-планувальних рішень ПСМ, умов експлуатації та т. д.)[23].

У зв'язку з цим, питання розробки нових схемних рішень, методик проєктування і оптимізації теплонасосних систем теплохолодопостачання ПСМ визначає актуальність цих досліджень[22].

### **2.2.1 Досвід інших країн у впровадженні систем перетворення низькопотенціальної теплоти**

Досвід впровадження ТНУ для теплопостачання об'єктів метрополітену в Україні і країнах СНД порівняно невеликий. У 2000 р співробітниками ІТТФ НАНУ була розроблена і впроваджена технологічна схема утилізації надлишкового тепловиділення машинного залу ескалаторів за допомогою досвідченої парокомпресіонної ТНУ «повітря - повітря» TADIBAN "SKY-90". У роботах [24, 25] показано, що використання парокомпресійних теплонасосних установок в системах місцевої витяжної вентиляції забезпечує помітний ефект енергозбереження в межах однієї станції. Розрахункова річна економія від зниження споживання метрополітеном енергії від тепломережі на станції «Майдан Незалежності» в м.Києві склала 30% [24]. За запропонованою схемою можливо тільки часткове покриття теплового навантаження станційних споруд метрополітену. Як правило, споживачами теплоти є службові приміщення, розташовані під платформою.

У Мінському метрополітені встановлено 22 ТНУ загальною потужністю 403 кВт. В якості джерела теплоти використовуються як вентиляційні викиди, так і стічні води на станції, а також відкачувана з тунелів ґрунтова вода[22].

У 2012 році інститутом спільно з електромеханічної службою Московського метрополітену, в роботі [26] було розглянуто варіант технічного рішення з використанням скидний теплоти (патент на корисну модель № 120753, пріоритет від 02.05.2012) стосовно до систем теплопостачання станцій метро «Нагатинська» і «Пушкінська» Московського метрополітену.

Для оцінки доцільності застосування теплонасосних установок в системах теплопостачання зазначених станцій були використані відомості по тепловим навантаженням, отримані з досвіду проектування і експлуатації метрополітену для кліматичних умов Москви. Результати показали однозначну перспективу у використанні теплових насосів.

Станція «Нагатинська» не мала можливості підключення до міських теплових мереж, і її теплопостачання здійснювалося від котельні підприємства ТОВ «Прачечна 7» при відносно високій вартості одиниці теплової енергії.

Тому були розглянуті можливість і доцільність заміни існуючої схеми теплопостачання на схему з тепловим насосом.

При цьому передбачалося, що теплонасосні установки будуть експлуатуватися тільки в опалювальний період для покриття теплових навантажень двох вестибюлів станції «Нагатинська» за рахунок низкопотенціальної теплоти від джерел тепловиділень метрополітену в кількості 2108,33 Гкал/рік. Цього вистачає для покриття теплових навантажень чотирьох теплових завіс (60,45%), гарячого водопостачання (21,41%), вентиляції підсобних приміщень (11,05%), опалення службових приміщень та касових залів (7,09%).

Розрахунки, виконані для системи теплопостачання станції «Нагатинська» з урахуванням результатів обстеження, показали, що впровадження теплонасосних установок дозволяє усунути залежність

постачання теплової енергії від стороннього джерела, різко скоротити експлуатаційні витрати (приблизно в 2,7 рази), при досить високих початкових капіталовкладень забезпечити прийнятний термін їх окупності (менш 4 років при терміні служби встановленого основного обладнання до 30 років)[26].

Слід зазначити, що перелік схем теплохолодопостачання за допомогою парокомпресійних ТНУ, реалізація яких можлива в умовах метрополітену, вельми обмежений [27]. Перш за все, це пов'язано з наявними на станціях обсягом і температурним рівнем вихідних повітряних потоків скидний теплоти систем місцевої вентиляції.

Більш широкі перспективи для впровадження альтернативних джерел теплової енергії розкриваються в разі утилізації скидної теплоти вихідних потоків тунельної вентиляції, особливо станцій глибокого закладення (18-30 м). З урахуванням теплообміну тунельного повітря з ґрунтовим масивом його температурний потенціал в холодний період року становить в середньому 14°C при витраті до 80 м<sup>3</sup>/с [28]. Тут вже можна говорити про значному покритті теплової і навантаження всієї станції за рахунок декількох ТНУ, які можуть експлуатуватися за різними схемами.

На температурний рівень скидного повітря систем вентиляції метрополітену впливає безліч факторів: глибина закладення станції, інтенсивність руху поїздів, розмір пасажиропотоку, кліматичні умови на поверхні і т.д.. Для станцій, розташованих в центральних районах міста і кінцевих ділянках ліній метро вони можуть істотно відрізнятися, а відповідно, буде різним і температурний потенціал скидний теплоти. Джерелом низькопотенційної теплоти є надлишкові пікові тепловиділення, що виникають при роботі рухомого складу, випрямних і розподільних пристроїв акумуляторних кабельних колекторів, тягово-знижувальних і знижувальних електропідстанцій. Впровадження ТНУ доцільно, в першу чергу, на станціях мають значні видаткові і тепловологостної характеристики витяжного вентиляційного повітря. Таким тепловим потенціалом володіють станції глибокого закладення, станції пересадки з максимальним пасажиропотоком, а



також станції, що мають прилеглий протяжний підземний перехід. Утилізація теплоти вентиляційних викидів тунельної вентиляції за допомогою ТНУ може забезпечити повітряне опалення наземних об'єктів торгівлі та громадського харчування, розташованих в безпосередній близькості від станції[22].

### **2.2.2 Оцінка роботи обладнання та ризики його роботи під час тривалого терміну експлуатації**

Чисельні експерименти за прогнозом теплової поведінки підземних об'єктів метрополітену показують, що при багаторічній експлуатації, які мають місце в пасажиропотоках і застосовуваних технологіях вентиляції метрополітену, забезпечення в тунелях і на станціях нормативних параметрів мікроклімату фізично неможливо (рис. 2.13). Як показують розрахунки, багаторічна експлуатація Київського метрополітену при збереженні незмінними існуючі технології вентиляції в часовому діапазоні 30 років в жарку пору року призведе до ненормативного збільшення температур внутрішнього повітря в тунелях: до 42°C до 10-го року експлуатації і до 47°C до 30-го року експлуатації, а на станціях - до 34 і 42°C відповідно. Важливо відзначити, що при проведенні численних експериментів все наявні інформативні невизначеності у вихідних даних трактувалися «на користь» застосування існуючих технологій. Так, наприклад, в розрахунках допускалися негативні температури внутрішнього повітря в тунелі і оточуючих шарах ґрунту без зниження обсягів подачі припливного повітря, чого в дійсності не допускається, внаслідок чого знижується можливість акумулювання холоду в ґрунті в зимову пору року [17].

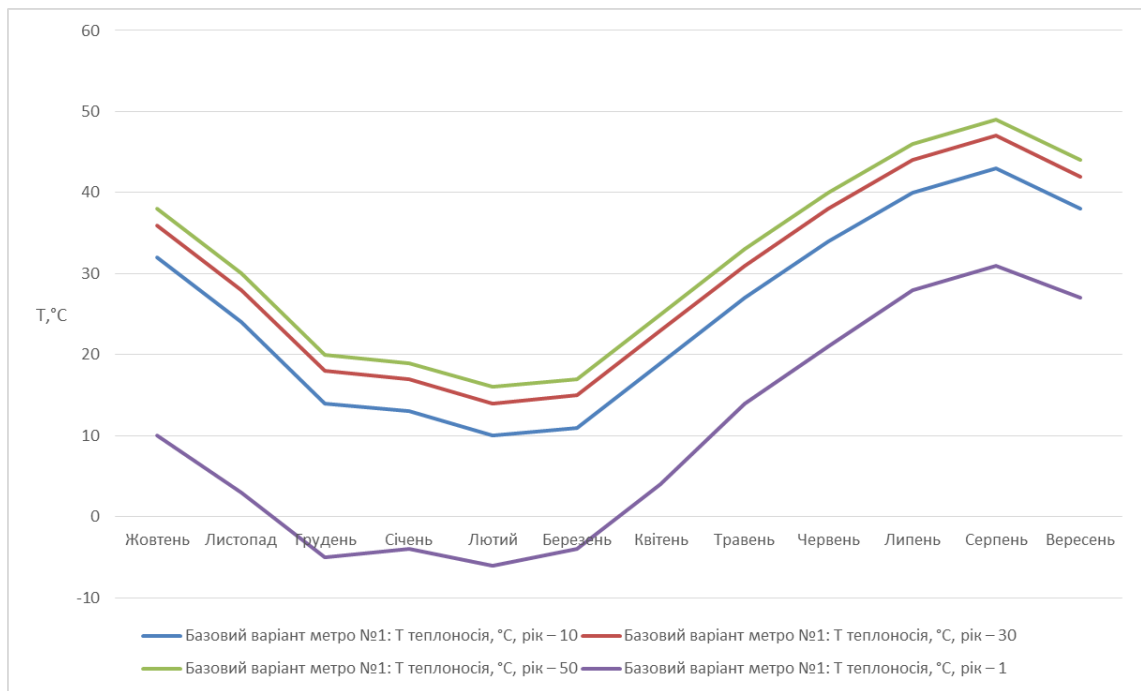


Рисунок 2.13 – Прогноз зміни температури внутрішнього повітря на станціях метрополітену при збереженні застосовуваних технологій вентиляції та умови забезпечення нормативного повітрообміну[29]

Результати численних експериментів показують, що подальша багаторічна експлуатація Київського метрополітену без підігріву припливного повітря системи вентиляції в зимову пору року і охолодження в жарку пору року неприпустима. Фізично неможливо забезпечити нормовані і безпечні для пасажирів параметри мікроклімату в пасажирському просторі без модернізації застосовуваних технологій вентиляювання підземних споруд. Важливо відзначити, що зі збільшенням пасажиропотоків в метрополітені ця ситуація тільки погіршуватиметься. Крім того, негативний вплив на ситуацію має підвищення температур зовнішнього повітря і температур ґрунту, що оточує підземні об'єкти метрополітену. Неврахування цих обставин може в найближчому майбутньому при настанні жаркого літа (близького до 2030 року) привести до теплового колапсу в Київському метрополітені[23].

Застосовані сьогодні застарілі технології забезпечення мікроклімату на підземних об'єктах метрополітену не можуть підтримувати значення параметрів мікроклімату на нормативному і безпечному для пасажирів рівні.

Ця ситуація негативно позначається на конкурентоспроможності громадського транспорту міста Київ в цілому і метрополітену зокрема, що, в свою чергу, може завдати серйозної шкоди місту[22].

Експлуатація підземних об'єктів метрополітену і пов'язані з ним скидання/споживання теплової енергії з ґрунтового масиву до кінця опалювального сезону викликають зниження температури навколишнього масиву ґрунту, а до кінця спекотного періоду року його підвищення. При цьому, як показують чисельні експерименти, в геокліматичних умовах міста Київ його нагрівання в літній період року не встигає компенсуватися протягом опалювального сезону, і до початку наступного опалювального сезону ґрунт виходить з підвищеним температурним потенціалом. Споживання і скидання теплової енергії в ґрунт протягом наступного року викликають подальше підвищення температури ґрунту, і до початку опалювального сезону його температурний потенціал під впливом експлуатаційних тепловиділень від поїздів і пасажиропотоків ще збільшується і все більше відрізняється від природного. І так далі. Відзначимо, що тепловий вплив багаторічної експлуатації метрополітену на природний температурний режим ґрунту має яскраво виражений експонентний характер, і до п'ятого року експлуатації ґрунт виходить на новий режим, близький до періодичного. Тобто, починаючи з п'ятого року, багаторічна експлуатаційна вплив метрополітену на навколишній ґрунтовий масив супроводжується періодичними змінами його (ґрунтового масиву) температури. Тому при проектуванні підземних об'єктів метрополітену і визначенні енергетичних навантажень на його кліматичні системи необхідно враховувати зміну (збільшення) температур навколишнього ґрунтового масиву, викликане багаторічною експлуатацією метрополітену, і використовувати в якості розрахункових параметрів і температур ґрунтового масиву параметри і температури ґрунту, очікувані не менше ніж на п'ятий рік експлуатації проектного підземного об'єкта метрополітену [18, 19].

### **2.2.3 Системи кондиціювання та опалення на зворотному циклі Брайтона**

В останні роки зріс інтерес до застосування в системах кондиціювання і опалення повітряних холодильних машин (ПХМ) і повітряних теплонасосних установок (ПТНУ), в основі роботи яких лежить зворотний цикл Брайтона. Раніше область застосування ПХМ в основному обмежувалася спеціальними системами кондиціювання (в авіації, в шахтах). Досягнення сучасної техніки, а саме поява високоефективних компресорів та детандерів, дозволили по-новому поставити питання про доцільність використання таких установок в системах теплохолодопостачання. У зв'язку з цим, особливу актуальності набувають роботи з наземного використання авіаційних турбодетандерів і турбокомпресорів, відпрацьованих льотний моторесурс, в системах теплохолодопостачання об'єктів промислового і цивільного призначення. Областю застосування таких «Конверсійних» ПХМ можуть бути системи вентиляції та опалення станцій метрополітенів.

Застосування ПХМ для комплексного теплохолодопостачання підземних і надземних об'єктів метро може бути доцільно з кількох причин. В першу чергу це необхідність охолодження приміщень повітрям при високому аеродинамічному опорі системи вентиляції метрополітену. Відомо [30], що ефективність застосування парокомпресійної машини, що працює в системі охолодження з противотиском знижується зі збільшенням аеродинамічного опору системи більше  $1000 \text{ кгс/м}^2$ . Крім того, в цьому випадку необхідно відводити всю теплоту, еквівалентну роботі стиснення вентилятора в водяному теплообміннику. В іншому випадку ця теплота буде додатковим навантаженням на парокомпресійну холодильну машину.

Іншим фактором, є відповідність ПХМ вимогами вибухо- і пожежобезпеки. У системах вентиляції метрополітену застосування холодильних установок, в яких робочим речовиною є фреон, допускається тільки у виняткових випадках при відповідному економічному обґрунтуванні. У свою чергу, ПХМ можуть забезпечити змінний витрата повітря, швидкий

вихід на заданий температурний режим, мають більш широким діапазоном зміни температури, тиску і вологості повітря, що подається. Повітря тут є і холодоагентом і холодоносієм і робочою речовиною. Крім того, за інших рівних умов капітальна вартість ВХМ менше, ніж у парокомпресійних установок[31].

Високий рівень шуму ПХМ, який є одним із серйозних перешкод для їх застосування на цивільних і адміністративних об'єктах в експлуатаційних умовах метрополітену нівелюється. Єдино можливим негативним моментом, який може стримувати впровадження ПХМ і ПТНУ в системи теплохолодопостачання метрополітену, є порівняно висока питома витрата електроенергії на виробництво теплоти і холоду. Рациональний вибір умов експлуатації ПХМ і ПТНУ і оптимізація параметрів термодинамічної циклу дозволить забезпечити такий же рівень витрат енергії по порівняно з парокомпресійною ТНУ[32].

Відомо, що зворотний газовий цикл Брайтона, маючи відносно низьку ефективність в той же час, він володіє більш широким діапазоном для оптимізації параметрів в порівнянні з парокомпресійною циклом. При певних умовах роботи ПХМ має місце максимум холодильного коефіцієнта і коефіцієнта перетворення, відповідний мінімального споживання енергії. У зв'язку з цим практичний інтерес представляє завдання оптимізації параметрів термодинамічної циклу ПХМ і ПТНУ.

Обмеження тут накладаються вимогами до параметрів вентиляційного повітря, можливостями технологічного обладнання систем вентиляції (рівнем тисків), а також значеннями ККД компресорів і детандерів. Таким чином, холодильний коефіцієнт або коефіцієнт перетворення виступає в якості цільової функції в задачі оптимізації ПХМ і ПТНУ.

За опалювальний період року з витяжним повітрям системи вентиляції метрополітену в атмосферу міста з 1 км двонаправленої лінії «викидається» близько 6900 МВт·год теплової енергії. При вторинному використанні цієї енергії за допомогою теплонасосних систем теплопостачання можливо

забезпечити опалення 125 тис.м<sup>2</sup> житлових будинків. Якщо перерахувати на загальну довжину ліній Київського метрополітену, то за рахунок вторинного використання «скидного тепла» його вентиляційних викидів можна опалити 3,2 млн м<sup>2</sup> житла[31-33].

Кращою технологією підвищення енергоефективності та поліпшення мікроклімату в підземних об'єктах метрополітену є рекуперація «скидного» тепла/холоду витяжного повітря в витяжних вентиляційних шахтах і підігрів/охолодження приточного повітря в припливних вентшахтах з включенням в незамерзаючий гідравлічний контур рекуперації теплонасосного обладнання (рис. 2.14)[30].

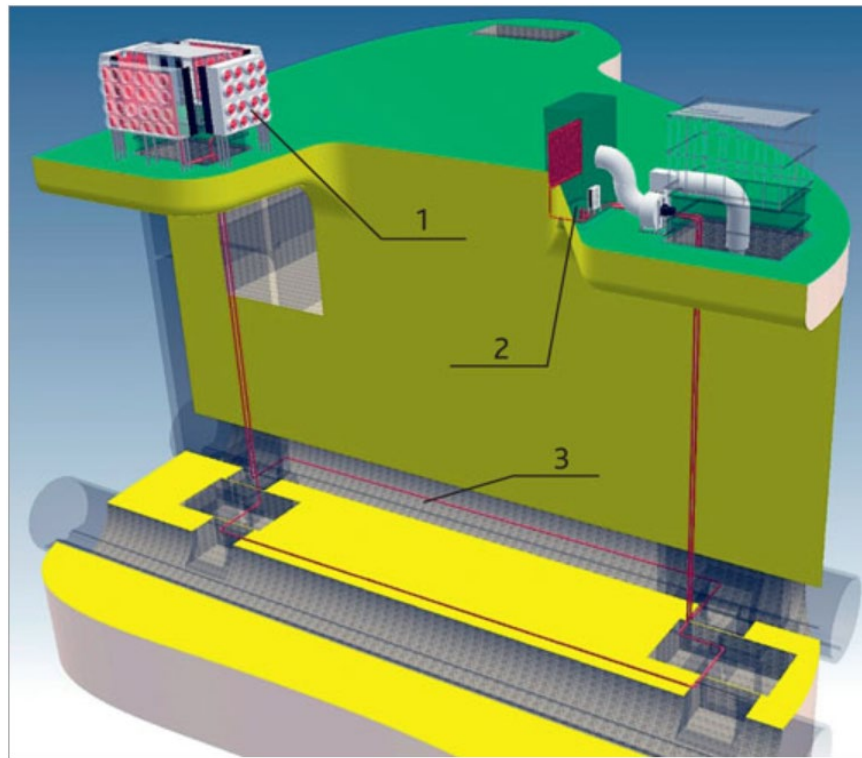


Рисунок 2.14 – Схемне рішення теплонасосної системи рекуперації та утилізації теплоти витяжного повітря системи вентиляції метрополітену: 1 – блок утилізації витяжного повітря назовні; 2 – блок підігріву припливного повітря; 3 – тунелі метрополітену і трубопроводи, що з'єднують блоки[29]

Схема передбачає 30%-ву рекуперацію теплоти витяжного повітря в зимову пору року і 15% -ву рекуперацію «холоду», що видається з витяжним повітрям вентиляцією, в жарку пору року. Більш кращим є одноступінчатий варіант реалізації схеми. У цьому варіанті конденсатор теплового насоса

безпосередньо вбудований в гідравлічний контур по ходу теплоносія перед теплообмінником, що нагріває припливне повітря, а випарник - після нього, перед теплообмінником, охолоджуючим витяжної повітря. У жарку пору року теплонасосної обладнання реверсують і охолоджують припливне повітря, а «скидання» надлишкового тепла здійснюється через теплообмінник, вбудований в витяжну вентиляційну шахту. Схема рекуперації дозволяє забезпечувати норму концентрації CO<sub>2</sub> в повітрі тунелю і цілий рік подавати розрахункову кількість свіжого приточного повітря в тунель, не побоюючись негативних або надмірно високих температур[33, 34].

## **2.3 Дослідження можливості використання повітряних потоків в тунелі метрополітені**

### **2.3.1 Оцінка впливу наземного вітрового генератора на оточуюче середовище**

Один із способів отримання енергії - це використання сили вітру. Встановивши вітряної перетворювач, можна перетворити кінетичний рух повітряних мас в механічне обертання ротора, з якого, в свою чергу, перенаправити крутний момент, наприклад, на електричний генератор[35]. Таким чином, буде вироблена електроенергія від поновлюваного природного джерела - вітру [36,37].

Даний метод отримання енергії є безпечним, але все ж має недоліки. Наприклад, несприятливий вплив вітроенергетики на навколишнє середовище, яка виражається в наступному:

1) Відчуження земель. Вітрові генератори не можуть перебувати близько один до одного, так як внаслідок інтерференції їх потужність буде зниженою. Вітрові електростанції вимагають приблизно 0,1 км.кв. вільного простору на 1 МВт номінальної потужності.

2) Вплив на тваринний світ. Вплив на тваринний світ виражається в небезпеці для водних організмів, птахів і комах. Вплив на іхтіофауну найбільш небезпечно в період будівництва ВЕС: порушення в природному середовищі

призводять до міграції і загибелі риби. У період спорудження змінюються донні опади і структура турбулентних потоків, що несприятливо відбивається, перш за все, на донних організмах. Величина впливу залежить від характеру субстрату, воно мінімально в разі скельних донних ґрунтів. Що стосується впливу на птахів, то їх загибель птахів становить 0,3-0,4 птиці на 1 гіговатт-годину електроенергії.

3) Шумовий вплив. Шумовий і візуальний вплив відносно малий.

4) Візуальний вплив.

5) Електро-, радіо- і телевізійні перешкоди. Через відображення радіохвиль УКХ і СВЧ-діапазону від рухомих лопатей порушується нормальна робота навігаційного обладнання авіалайнерів і утруднюється прийом телевізійних передач[37].

Таким чином можна зробити висновок про те, що використання вітрогенераторів (вітроустановок) у відкритій місцевості має безліч обмежень і недоліків.

Для більш екологічного використання вітрогенераторів пропонується спосіб використання вітрогенератора в закритих місцевостях (наприклад, в метрополітені)[39].

### **2.3.2 Аналіз можливості впровадження вітроелектро генератору в умовах підземного тунелю**

Світове споживання електричної енергії в світі можна розділити на кілька частин. Промислові споживачі електроенергії (фабрики, заводи, сільське господарство, гірничодобувна галузь і ін.) споживають близько 37% від всієї виробленої енергії. Особистий і комерційний транспорт споживає близько 20%; опалення, освітлення, система каналізації і електроприлади використовують 16%. Решта 27% світового споживання енергії є втратами при її виробництві і транспортуванні. Таким чином, електропостачання транспорту є серйозної і глобальним завданням, враховуючи постійне



зростання вантажних і пасажирських перевезень, викликаний зростанням населення планети[40].

Залізничний транспорт є одним з найбільших споживачів електричної енергії. В рік він витрачає понад 60 млрд. кВт/год електричної енергії, тому без сумніву, що боротьба за її економію - найважливіша справа працівників локомотивного господарства. Наприклад, в Голландії, з 1 січня 2017 року всі поїзди забезпечуються електроенергією, одержуваної від вітрових електростанцій. У Росії, вже до 2030 року 10% потреб стаціонарної енергетики буде забезпечено завдяки поновлюваних джерел енергії (біопаливо, енергія сонця, вітру, водневі паливні елементи та ін.). У Німеччині до кінця 2017 року було закінчено роботу над поїздом, що працює на водневому паливі[41].

Крім зростання перевезень постійно зростає і швидкість руху рухомого складу. Починаючи з 70-х років двадцятого століття, в розвинених країнах світу починають з'являтися високошвидкісні магістралі, швидкість руху поїздів, на яких може досягати понад 300 км / ч. на сьогоднішній день швидкості руху поїздів на деяких ділянках досягають 500 км / год. Але і ця цифра в найближчому майбутньому вже не буде межею. Повсюдно ведуться розробки високошвидкісних поїздів на магніто-левітаційній подушці, завдяки якій значення швидкості може збільшитися в кілька разів. Дане технічне рішення буде корисно для країн, що мають велику площу[39].

Також, при розгляді шляху руху рухомого складу можна зробити висновок про те, що залізнична колія може розташовуватися як на відкритій місцевості, так і в тунелі.

Ще одним випадком руху поїзда в тунелі можна вважати систему міського метрополітену. Безсумнівно, система метрополітену вважається ключовий при оцінці загального пасажиропотоку великого населеного пункту. На сьогоднішній день вже неможливо уявити великі мегаполіси, такі як Москва, Санкт-Петербург, Токіо, Нью-Йорк без метрополітену.

Таким чином, рух рухомого складу в тунелі - поширена і розвивається практика в сучасній транспортній системі. Однак не можна забувати, що

тунель створює додатковий опір руху поїзда, яке було детально вивчено в працях[41].

### **2.3.3 Дослідження аеродинамічних характеристик вітрового потоку при проходженні рухомого складу в тунелі**

Також, під час руху поїзда по тунелю виникають складні аеродинамічні процеси, серед яких особливе значення має так званий «поршневий ефект». У залізничному тунелі, на відміну від автомобільного, цей ефект особливо помітний, тому що поїзд займає більшу частину перетину одноколійного тунелю і має довжину, порівнянну з довжиною тунелю. Питання про розподіл повітряних мас в тунелі, а також «Поршневий ефект» вже давно є об'єктом для дослідження багатьох вчених в світі. Наприклад, була запропонована математична модель, яка дозволила описати дію «поршневого ефекту» від поїздів. Дана модель дозволила розрахувати витрати, а також статичний тиск повітря в тунелі в залежності від швидкості руху поїзда і його розташування в тунелі. Також, експериментальним шляхом було перевірено математична модель[42].

З розвитком високошвидкісних магістралей виникають проблеми, які пов'язані з рухом поїзда в тунелі. Найголовніша з них – це взаємодія поїзда з повітряним середовищем. Аеродинамічні процеси, які відбуваються в тунелі при проходженні через нього високошвидкісного поїзда вдають із себе перепади статичного тиску, тунельні хвилі тиску і хвилі мікротиску [43].

Простір між стінками тунелю і складом в цілому невелика, тому частина повітря виштовхується з тунелю, а частина обтікає поїзд. Самий дієвий спосіб зниження аеродинамічних ефектів - це збільшення площі поперечного перерізу тунелю. Однак, цей спосіб є дорогим. Орієнтовний збільшення площі перерізу тунелю при підвищенні швидкості поїзда, що проходить через нього, згідно, представлено на рис. 2.15.

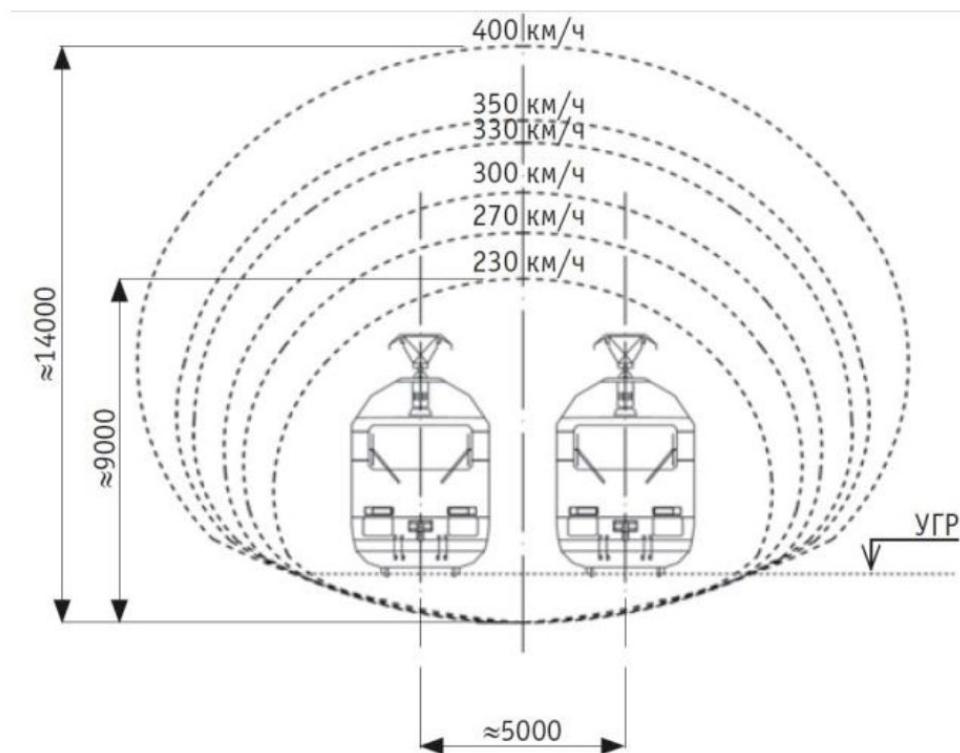


Рисунок 2.15 - Збільшення площі перерізу тунелю при підвищенні швидкості поїзда[41]

Процес входження поїзда в тунель можна розділити на кілька етапів. На першому етапі відбувається входження носової частини тягового локомотива в тунель. При цьому виникає стрибкоподібний ріст тиску, утворюється повітряна хвиля стиснення. Другим етапом можна вважати входження в тунель всього складу. Тиск продовжує збільшуватися. Третій етап - входження в тунель хвостовій частині складу, при якому відбувається стрибкоподібне падіння тиску, завдяки чому виникає хвиля розрядження повітря.

Подальший рух по тунелю представимо у вигляді працюючого поршня. Поїзд надає руху нерухоме повітря, що знаходиться в тунелі. Виникає перед поїздом надлишок тиску витрачається на подолання повітряного опору на передній ділянці тунелю.

Надлишок тиску, який виникає за складом, витрачається на подолання опору повітря, що знаходиться в задньому ділянці тунелю.

Виникаюча при цьому різниця тисків перед головним і за останнім вагонами може викликати перетікання повітря уздовж зазору між тунелем і

стінками поїзда, і направлено у зворотний бік [44]. При цьому сила опору поїзда затягує повітряні маси в зазорі у напрямку руху.

Наведені вище теоретичні роздуми наводять на думку про тому, що при пригоді високошвидкісного поїзда через тунель відбуваються складні аеродинамічні явища і процеси. Рухомий склад який штовхає, завдяки «поршневого ефекту», повітряні маси, а також які захоплюються за поїздом, несуть в собі колосальну енергію, варіант використання яких розглянуто в дисертації.

На рисунках 2.16 і 2.17 представлено дослідження величини повітряних мас, які утворюються в наслідок взаємодії рухомого складу в тунелі.

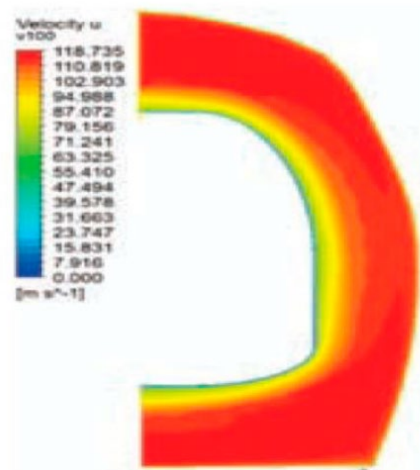


Рисунок 2.16 - Швидкість в повітряних зазорах тунелю, при проходження високошвидкісного поїзда[41]

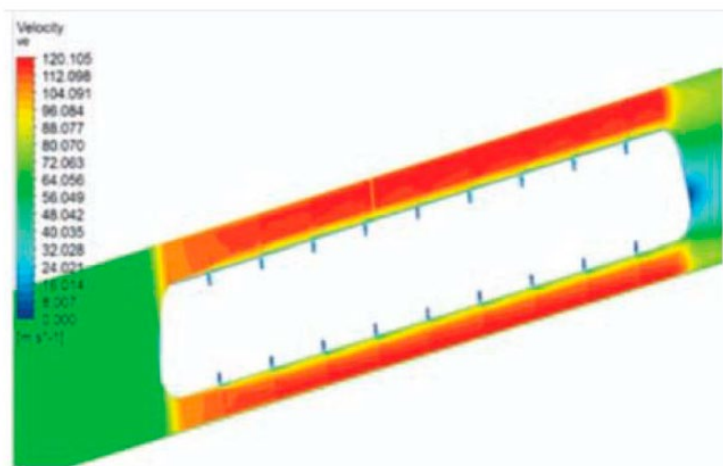


Рисунок 2.17 - Швидкість в повітряних зазорах тунелю, при проходження високошвидкісного поїзда[41]

Також, в результаті моделювання були отримані значення динамічного тиску повітря, представлені на рисунку 2.18. Бачимо, що значення тиску змінюється від 5 кПа в головній частині до 7 кПа в кінці руху[45].

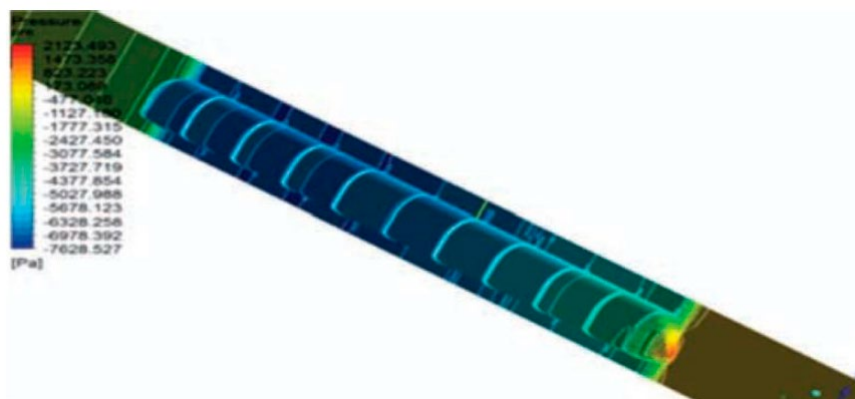


Рисунок 2.18 – Динамічний тиск повітря[41]

Отримані дані значень швидкостей і перепадів тиску в тунелі з результатів досліджень і теоретичних роздумів дозволяють розглянути можливість установки вітроенергетичних установок (ВЕУ) в тунелях колійного транспорту.

Розглянемо варіант використання ВЕС в тунелях метрополітену, в якому є певні особливості: відносно мала швидкість рухомого складу, а отже відносно малий розмір поперечного перетину тунелю; при досить малих швидкостях, метрополітен має дуже високу інтенсивність руху, що нівелює цю малу швидкість рухомого складу[46].

### **Висновки до розділу:**

1) В розділі проведено аналіз споживання електроенергії в метрополітені, який показує, що найбільш вагомою складовою є витрати на тягу рухомого складу. Стало відомо, що процес рекуперації за рахунок великого гальмівного шляху рухомого складу метрополітену, практично не ефективний без застосування систем накопичення. Тому важливим питанням є підбір раціональних параметрів ємнісного накопичувача, який дозволить ефективно використовувати енергію рекуперації. Проведено порівняльну характеристику між різними видами електрифікованого транспорту, в якому

має ряд переваг саме метрополітен. Встановлено, що впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену дозволить скоротити споживання електроенергії на тягу в значній кількості, що в майбутньому буде тільки зростати, з розвитком технологій.

2) Проведений аналіз підтвердив актуальність проблеми підвищення енергетичної ефективності для метрополітену будь-якого міста, не тільки в Україні, для якого сьогодні з особливою гостротою постає питання зниження «перегріву» тунелів і пасажирських просторів в літню пору року. Дисбаланс теплового режиму метрополітену призводить до негативного впливу на тепловий режим тунелів і станцій і що накопичується з часом «теплового забруднення» ґрунтових масивів, що оточують тунелі і об'єкти метрополітену, яке, в свою чергу, призводить до зниження тепловтрат в ґрунт і «перегріву» внутрішнього повітря на станціях.

3) Дослідження можливості застосування вітрогенераторів в умовах закритого середовища (тунелях), в якому є постійне джерело вітрового потоку має перспективний характер, який дозволить виробляти електричну енергію. Визначено недоліки вітрогенераторів при застосуванні в відкритій місцевості. Проаналізовані перспективні дослідження впливу швидкості рухомого складу на зміну процесу утворення повітряного потоку в тунелі, і як наслідок даний напрям дозволить розвивати енергоефективні технології колійного електрифікованого транспорту.

## **3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ЗАХОДІВ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЕЛЕКТРИФІКОВАНОМУ ТРАНСПОРТІ**

### **3.1 Питання енергоефективності шляхом впровадження систем рекуперації енергії**

#### **3.1.1 Результати досліджень з визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача методом мінімальної окупності**

*Перший етап.* В якості дослідної обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен».

*Другий етап.* Прийнято наступні типові умови експлуатації поїзда метрополітену:

- а) у робочі дні (5 днів на тиждень):
  - три та два повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні;
  - одне та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні;
  - одне повне коло з дотриманням «непікового» графіку руху при мінімальному завантаженні;
- б) у вихідні дні (2 дні на тиждень) два, сім та одне повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно при мінімальному, номінальному та максимальному завантаженні.

Прийнято, що протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

*Третій етап,* який передбачає експериментальне дослідження енергетичних процесів під час типових умов експлуатації, проводиться з використанням дослідного комплексу.

Дослідження виконані за допомогою випробувального комплексу, в склад якого входять модернізований дослідний поїзд та вимірювальна система, що встановлена на його борту (рис. 3.1)[11].

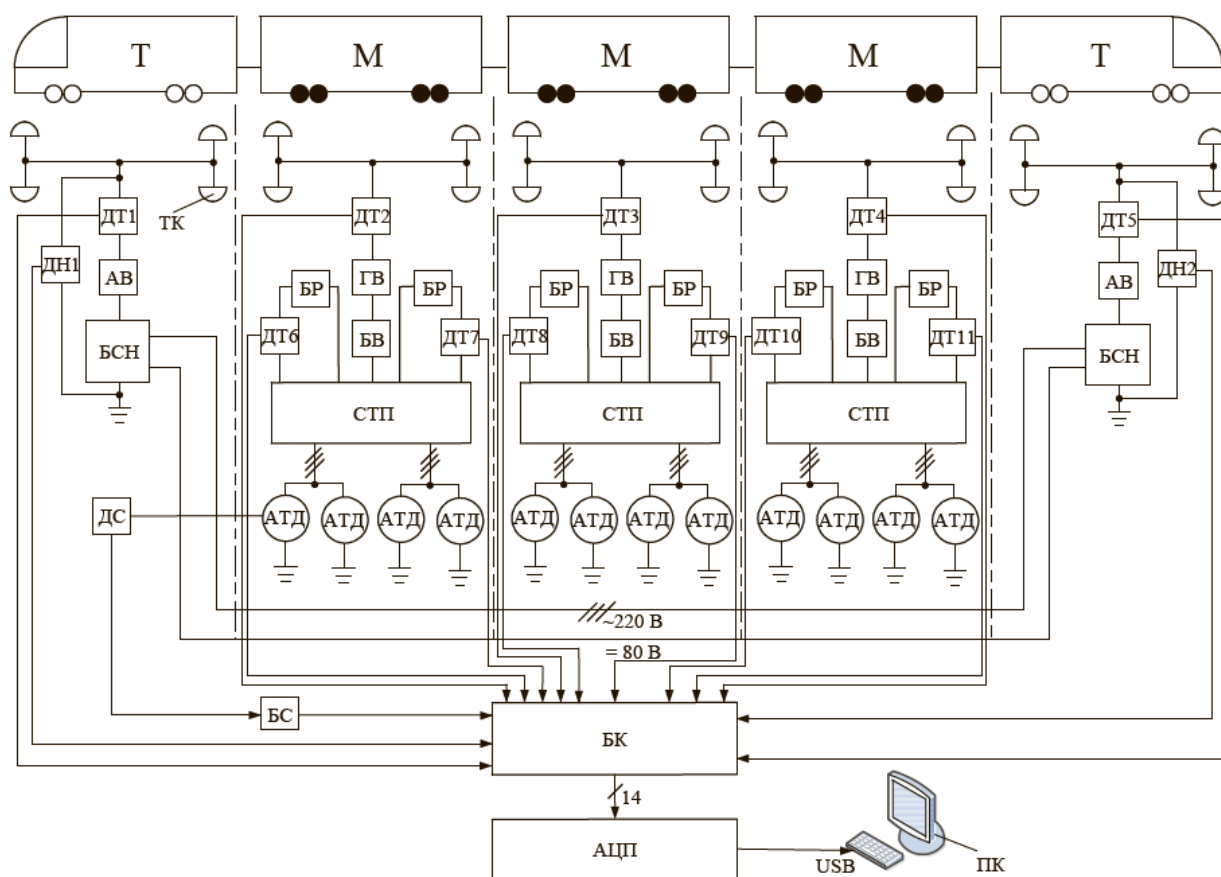


Рисунок 3.1 – Блок-схема вимірювального комплексу[11]

Дослідний модернізований поїзд складається з п'яти вагонів, в якому головні вагони - безмоторні, проміжні - моторні (комплектація 3М + 2Т).

Головні вагони укомплектовані блоками власних потреб (БВП), які з'єднані з струмоприймачами (СТ) через автоматичні вимикачі (АВ). Встановлені БВП забезпечують живленням нетягове електрообладнання поїзда. Основними функціями АВ є підключення кола живлення нетягового електрообладнання до контактної мережі та його захист під час виникнення аварійних ситуацій. Встановлені на головних вагонах СТ забезпечують споживання електроенергії з мережі на власні потреби.

Проміжні вагони укомплектовані асинхронними тяговими двигунами (АТД) типу МВ-5149-А на кожній колісній парі з наступними номінальними параметрами:  $P_n = 150$  кВт;  $U_n = 610$  В;  $I_n = 185$  А;  $f_n = 65$  Гц,  $\eta_n = 0,91$ ;  $n_n = 1900$  об/хв;  $s_n = 2,4$  %.[14]



Асинхронні ТД обмоторених вагонів отримують живлення від статичного тягового перетворювача (СТП), який складається з двох інверторів та має блочно-модульну конструкцію. Інвертори забезпечують регулювання вихідної напруги та частоти від нуля до максимального значення. Один інвертор забезпечує плавне управління двома АТД. Конструкція інвертора також передбачає рекуперативне гальмування за наявності споживача електроенергії в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів (БР) за їх відсутності. Силові тягові перетворювачі з'єднанні з СТ через швидкодіючий вимикач (ШВ) та головний вимикач (ГВ).

Вимикачі (ШВ, ГВ) встановлені на кожному проміжному обмотореному вагоні з метою підключення силового електрообладнання (СТП, АТД) до контактної мережі та його захисту під час виникнення аварійних ситуацій в силовому колі. Встановлені на проміжних обмоторених вагонах СТ, забезпечують енергообмін між мережею і вагонами в режимах споживання та рекуперації.[9]

Вимірювальна система розроблена провідними спеціалістами для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та поїздом в реальних умовах його експлуатації.

До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер (ПК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) та вимірювальні датчики.

В якості вимірювальних датчиків використовуються: одинадцять датчиків струму (ДС1-ДС11), два датчики напруги (ДН1-ДН2) та датчик швидкості (ДШ). Контроль спожитого струму на власні потреби здійснюється ДС1 і ДС5, контроль загального струму споживання на тягу та рекуперацію виконуються ДС2-ДС4, контроль струму при реостатному гальмуванні відповідно ДС6-ДС11. Контроль напруги контактної мережі здійснюється за допомогою ДН1 та ДН2. Вимірювання швидкості поїзда здійснюється за допомогою штатного ДШ[11].

Для узгодження типу та рівня вихідного сигналу ДШ з вхідним каналом АЦП використовується БУ. Сигнали з виходів вимірювальних датчиків через БК надходять на вхідні канали АЦП, який виконує функцію перетворення аналогових сигналів в цифрову форму для подальшої обробки на ПК.

Обробка даних на ПК здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» - спеціального програмного забезпечення розробленого для КП «Київський метрополітен».

Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді[9].

Слід зазначити, що дана система універсальна, оскільки може застосовуватись для дослідження енергопроцесів практично на всіх типах електрорухомого складу.

Експериментальні дослідження енергопроцесів між контактною мережею та модернізованим поїздом виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» під час руху поїздів в штатному режимі по «непіковому» графіку. Експерименти здійснювались при номінальному завантаженні вагонів модернізованого поїзда. Режим ведення дослідного поїзда відповідав дотриманню «непікового» графіку руху.

За допомогою вимірювальної системи (рис. 3.1) з частотою 2,5 кГц отримано осцилограми (рис. 3.2, рис. 3.3) напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху складу при його типових умовах експлуатації[11].

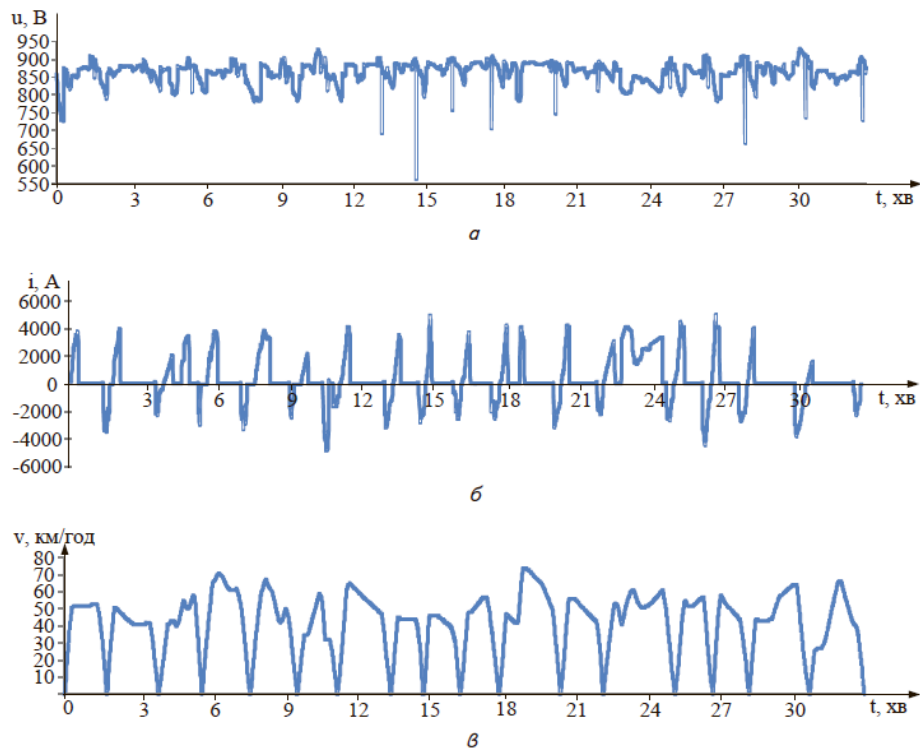


Рисунок 3.2 – Осцилограми напруги на струмоприймачі (а), струму поїзда (б) та швидкості руху поїзда (в) під час його експлуатації між станціями «Лісова-Академмістечко»[11]

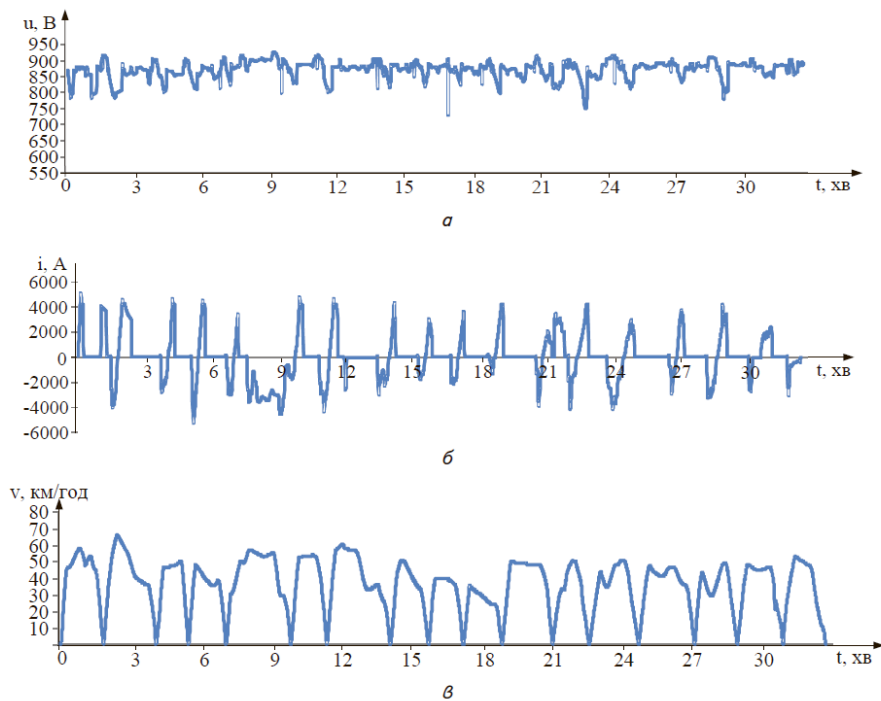


Рисунок 3.3 – Осцилограми напруги на струмоприймачі (а), струму поїзда (б) та швидкості руху поїзда (в) під час його експлуатації між станціями «Академмістечко-Лісова»[11]

Четвертий етап передбачає обробку масивів даних. Обробка даних здійснюється на персональному комп'ютері за допомогою атестованого програмного забезпечення КП «Київський метрополітен».

За результатами обробки масивів даних, що отримані під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації, визначаються наступні показники:

- середнє значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ( $U_{\text{сер.тяги}}, U_{\text{сер.рек}}$ );
- середнє значення струму в режимах тяги поїзда ( $I_{\text{сер.тяги}}$ );
- середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ( $I_{\text{сер.рек}}$ );
- середнє значення напруги на гальмівних резисторах ( $U_{\text{сер.}R}$ );
- середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах в режимі рекуперативного гальмування ( $I_{\text{сер.}R}$ );
- час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ( $t_{\text{тяги}}, t_{\text{рек.}}$ );
- середня експлуатаційна швидкість на перегоні ( $V_{\text{сер.екс}}$ ).

За визначеними значеннями величин в процесі обробки масивів даних розраховуються наступні енергетичні показники:

- кількість спожитої електроенергії в режимах тяги ( $A_{\text{тяги}}$ );
- кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ( $A_{\text{рек}}$ );
- максимальна потужність в режимах рекуперативного гальмування ( $P_{\text{max}}$ )[11].

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховується за формулою:

$$A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3.1)$$

Кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування, розраховується за формулою:

$$A_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000} + \frac{U_{\text{сер.Р}} \cdot I_{\text{сер.Р}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3.2)$$

Миттєва потужність поїзда для режимів рекуперативного гальмування визначається за виразом:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (3.3)$$

Максимальна потужність рекуперативного гальмування визначається за максимально зафіксованим значенням миттєвої потужності під час рекуперативного гальмування поїзда[11]:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \dots \\ p_n \end{bmatrix} \rightarrow P_{\text{max}}. \quad (3.4)$$

Результати розрахунків, виконаних за формулами (3.1)–(3.4), наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати обробки масивів даних

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху мінімальне/номінальне/максимальне завантаження поїзда			«Піковий» графік руху номінальне/максимальне завантаження поїзда		
	$A_{\text{тяги}},$ кВт·год	$A_{\text{рек}},$ кВт·год	$P_{\text{max}},$ кВт	$A_{\text{тяги}},$ кВт·год	$A_{\text{рек}},$ кВт·год	$P_{\text{max}},$ кВт
Лісова- Чернігівська	7,17/9,6 8/8,46	2,84/4,7 6/5,33	1445/1798 /2406	12,28/1 4,6	8,5/10, 06	3879/2 496
Чернігівська- Дарниця	6,45/10, 48/11,1 1	3,5/2,7/ 4,1	1119/1240 /2120	15,34/1 5,92	6,27/7, 67	2425/2 093
Дарниця- Лівобережна	7,89/16, 44/8,98	3,08/1,2 3/3,49	1143/1422 /1662	13,65/1 3,63	6,07/6, 65	2442/1 969
Лівобережна- Гідропарк	7,35/15, 24/9,8	3,11/4,1 8/5,93	1963/1665 /2701	14,26/1 8,68	8,59/1 0,51	2455/2 719
Гідропарк-Дніпро	13,61/2 2,82/21, 81	2,02/2,4 3/6,75	1216/1248 /2102	23,71/2 3,52	8,29/8, 07	2492/2 219
Дніпро-Арсенальна	3,64/4,6 3/3,48	5,88/9,6 8/8,97	2056/3028 /3364	3,38/2, 28	8,45/8, 22	2367/2 364
Арсенальна- Хрещатик	8,76/12, 03/12,7 7	2,35/4,4 9/4,89	993/1563/ 2313	13,92/1 3,94	4,59/6, 87	3050/2 208

Продовження таблиці 3.1

Хрещатик- Театральна	4,87/8,1 8/8,25	2,02/4,1 7/4,11	831/1333/ 1740	11,06/1 4,18	5,29/7, 69	1874/2 531
Театральна- Університет	5,91/8,1 4/9,2	2,25/3,2 1/4,14	867/1182/ 2027	11,3/13 ,55	3,64/5, 42	1178/2 733
Університет- Вокзальна	6,22/8,4 7/9,85	1,84/3,0 2/3,89	736/1147/ 1743	9,3/14, 45	3,15/6, 54	1038/3 060
Вокзальна-КПІ	10,84/1 6,19/16, 75	3,33/4,7 6/4,74	1022/1790 /2312	14,4/20 ,53	2,98/6, 48	1127/2 189
КПІ-Шулявська	8,68/11, 67/13,0 5	2,66/3,4 1/4,75	947/1451/ 2058	15,78/1 8,37	4,44/7, 31	1261/2 661
Шулявська- Берестейська	52,39/7 8,21/81, 31	3,48/4,0 8/4,29	1184/1379 /1675	79,27/8 4,09	3,51/5, 52	1182/1 904
Берестейська- Нивки	8,81/11, 96/17,6 8	3,19/7,1 6/9,04	1763/2508 /3073	15,78/2 1,82	7,36/1 1,64	2145/3 713
Нивки-Святошин	9,07/13, 61/13,6 9	2,44/3,6 4/3,76	828/1071/ 1784	13,15/9 ,66	3,36/3, 26	1071/2 478
Святошин- Житомирська	5,34/7,8 3/6,25	6,16/9,7 5/8,69	1695/2798 /2849	6,04/11 ,95	8,55/1 2,26	2177/3 437
Житомирська- Академмістечко	1,65/2,6 3/2,88	1,82/2,4 4/3,1	582/906/1 097	4,98/4, 15	4,34/3, 67	1772/1 299
Академмістечко- Житомирська	15,17/2 2,04/19, 03	3,61/5,5 4/3,78	1144/2023 /1677	24,22/2 5,22	6,75/7, 35	3050/2 668
Житомирська- Святошин	14,45/2 4,63/24, 56	2,87/3,9 4/3,47	931/1261/ 1729	24,14/2 5,92	7,05/4, 02	1242/1 843
Святошин-Нивки	6,31/10, 48/8,47	4,31/8,0 4/6,46	2029/3112 /3041	14,15/1 2,05	10,18/ 7,68	2835/2 565
Нивки- Берестейська	11,07/1 1,43/13, 39	5,22/5,4 4/6,35	2096/1722 /2936	15,5/17 ,85	7,01/8, 67	2352/2 901
Берестейська- Шулявська	4,94/5,1 4/5,11	25,3/44, 26/45,9 3	2677/2761 /3341	4,69/5, 72	44,35/4 5,36	2136/3 835
Шулявська-КПІ	7,53/14, 01/11,7 8	2,28/8,2 /6,6	1539/2462 /2934	9,28/17 ,83	5,19/9, 86	1720/3 376

Кінець таблиці 3.1

КПП-Вокзальна	11,07/1 4,76/15, 21	1,76/5,3 9/5,0	696/1294/ 1306	14,85/1 6,2	5,01/6, 35	1268/1 285
Вокзальна- Університет	6,86/8,0 4/8,15	1,9/2,33 /2,53	636/782/ 914	8,08/10 ,44	2,15/3, 89	720/18 19
Університет- Театральна	5,81/8,6 7/7,94	2,57/3,2 1/2,7	602/986/ 811	8,18/10 ,39	2,35/3, 97	764/14 39
Театральна- Хрещатик	6,01/6,7 /8,14	1,06/0,9 5/2,13	739/545/ 653	11,44/1 2,93	4,14/5, 49	1436/1 888
Хрещатик- Арсенальна	11,05/1 2,76/13, 83	2,99/3,3 8/5,0	934/1903/ 1815	12,58/1 3,88	3,34/4, 83	775/15 67
Арсенальна-Дніпро	15,76/2 2,94/23, 13	2,6/4,57 /4,5	1306/2208 /2478	22,42/2 2,32	4,35/3, 78	1400/1 629
Дніпро-Гідропарк	9,87/13, 61/10,4 9	6,27/11, 93/9,86	1845/2168 /2763	13,1/15 ,91	11,21/1 3,69	2757/3 106
Гідропарк- Лівобережна	8,71/12, 6/15,07	2,55/2,7 8/4,66	876/1300/ 1990	13,1/17 ,75	3,12/5, 64	952/19 61
Лівобережна- Дарниця	7,32/10, 44/9,96	3,69/5,6 9/5,42	944/1387/ 2396	12,45/1 2,83	7,21/7 ,1	1817/1 868
Дарниця- Чернігівська	9,91/12, 68/11,5 2	4,6/2,08 /6,13	1513/1114 /2217	11,34/1 1,0	5,91/5, 19	2024/2 590
Чернігівська- Лісова	8,36/14, 99/11,8 3	1,77/2,7 2/3,4	1089/1384 /979	16,28/1 5,4	6,3/6, 0	1512/3 017

На *n'ятому етапі* обираються бортові ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоємності за аналізом результатів обробки отриманих масивів даних під час експериментальних досліджень[11].

За результатами обробки даних кожного рекуперативного гальмування (табл. 3.1) видно, що значення максимальної потужності електроенергії змінюється в межах від 473 кВт до 3879 кВт, кількість електроенергії – в межах від 0,58 кВт·год до 45,93 кВт·год. Виходячи із отриманих меж зміни даних,

обрано бортові ЄНЕ з рівнем потужності і робочої енергоємності, які наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Обрані параметри бортових ЄНЕ

Потужність, кВт	Енергоємність, кВт·год
1000; 2000; 3000; 4000	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 20; 30; 45

Таким чином, загальна кількість обраних бортових ЄНЕ з різним рівнем потужності і енергоємності в даному випадку складає 52.

На *шостому етапі* оцінюється вартість систем накопичення за результатами аналізу вартості обраних бортових ЄНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектуючого обладнання від фірм-виробників даної продукції[9, 12].

Вартість обраних систем накопичення за результатами аналізу вартості обраних бортових ЄНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектуючого обладнання, наведено у табл. 3.3. Даний аналіз дозволив встановити, що вартість системи накопичення в основному залежить від вартості бортового ЄНЕ та реверсивного перетворювача, інше комплектуюче обладнання має значно меншу ціну[11].

Таблиця 3.3 – Вартість обраних систем накопичення

Потужність	Вартість з урахуванням різної робочої енергоємності бортових ЄНЕ [кВт·год], у. о												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	45
1000	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	4,0	8,0	18,6
2000	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8	1,9	5,3	9,9	21,2
3000	0,5	0,7	0,9	1,1	1,2	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	6,6	11,9	23,9
4000	0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	8,0	13,9	26,5

За результатами аналізу цін від фірм-виробників продукції (табл. 3.3) побудовано графіки у вигляді залежностей вартості систем накопичення від їх потужностей та енергоємностей (рис. 3.4).



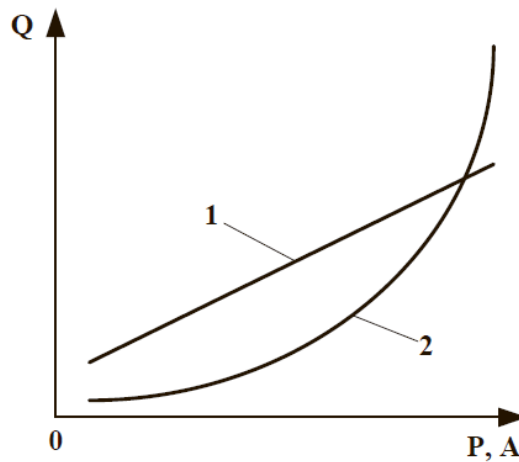


Рисунок 3.4 – Графіки зміни вартості систем накопичення в залежності від величини потужності та енергоемності: 1 – залежність  $Q = f(P)$  за умови  $A = \text{const}$ ; 2 – залежність  $Q = f(A)$  за умови  $P = \text{const}$ [11]

Сьомий етап полягає в оцінці кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Для кожного типу обраної системи виконуються дослідження. Спочатку для кожної типової умови експлуатації та обраної системи накопичення виконується перевірка на обмеження за потужністю, за результатами якої, при необхідності, відбувається перерахунок кількості рекуперованої електроенергії в накопичувач[11].

Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення:

- перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений;
- коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача складає 0,98 ( $\eta_{\text{ЕНЕ}} = 0,98$ );
- ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ( $\eta_{\text{РП}} = 0,96$ );
- ККД тягового двигуна – 0,94 ( $\eta_{\text{ТД}} = 0,94$ );
- ККД редуктора – 0,98 ( $\eta_{\text{РЕД}} = 0,98$ ).

Під час виконання досліджень визначались наступні показники: кількість заощадженої електроенергії за цикл збереження електроенергії (рекуперативне гальмування та її акумулювання) під час розгону поїзда,

кількість заощадженої електроенергії для кожної типової умови експлуатації, кількість заощадженої електроенергії за один день та рік.

Кількість заощадженої електроенергії за цикл рекуперативне гальмування-розгін поїзда визначається за формулою [9]:

$$E = A_{\text{рек}} \cdot \eta_{\text{тяги}}, \quad (3.5)$$

де  $\eta_{\text{тяги}} = \eta_{\text{снє}} \cdot \eta_{\text{рп}}^2 \cdot \eta_{\text{тп}} \cdot \eta_{\text{рек}}$  – ККД енергообмінних процесів за цикл збереження та акумулювання електроенергії рекуперації.

Кількість заощадженої електроенергії для кожної типової умови експлуатації визначається за формулою:

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_N, \quad (3.6)$$

де  $N$  – кількість циклів для типової умови експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за один день визначається за формулою:

$$E_d = m_1 \cdot E_{k1} + m_2 \cdot E_{k2} + \dots + m_n \cdot E_{kn}, \quad (3.7)$$

де  $m$  – кількість кіл за день для типової умови експлуатації поїзда;  
 $n$  – кількість типових умов експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначається за формулою:

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}, \quad (3.8)$$

де  $l_1, l_2$  – кількість робочих і вихідних днів на рік;  
 $E_{d1}, E_{d2}$  – кількість заощадженої електроенергії у робочий та вихідний дні відповідно.

З використанням вищезазначеного алгоритму та формул (3.5)–(3.8) визначено величину заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення[14]. Результати з оцінки кількості заощадженої електроенергії за рік для кожної з обраних систем накопичення приведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Кількість заощадженої електроенергії за рік

Потужність, кВт	Кількість заощадженої електроенергії з урахуванням різної робочої енергоємності бортових ЄНЕ [кВт·год], млн. кВт·год												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	45
1000	0,08	0,16	0,23	0,27	0,29	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,34	0,35	0,35
2000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,36	0,38	0,38	0,39	0,42	0,44	0,47
3000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,43	0,46	0,49
4000	0,08	0,16	0,24	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,43	0,46	0,49

Восьмий етап передбачає побудову характеристики (діаграм) терміну окупності систем накопичення в залежності від робочої потужності та енергоємності бортових ЄНЕ. Величина терміну окупності визначається за відношенням вартості від впровадження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії цією системою за рік[11]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r}, \quad (3.9)$$

де  $Q$  – вартість системи накопичення;  $T_e$  – тариф на електроенергію ( $T_e=1,97$  грн./кВт·год).

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 3.5.

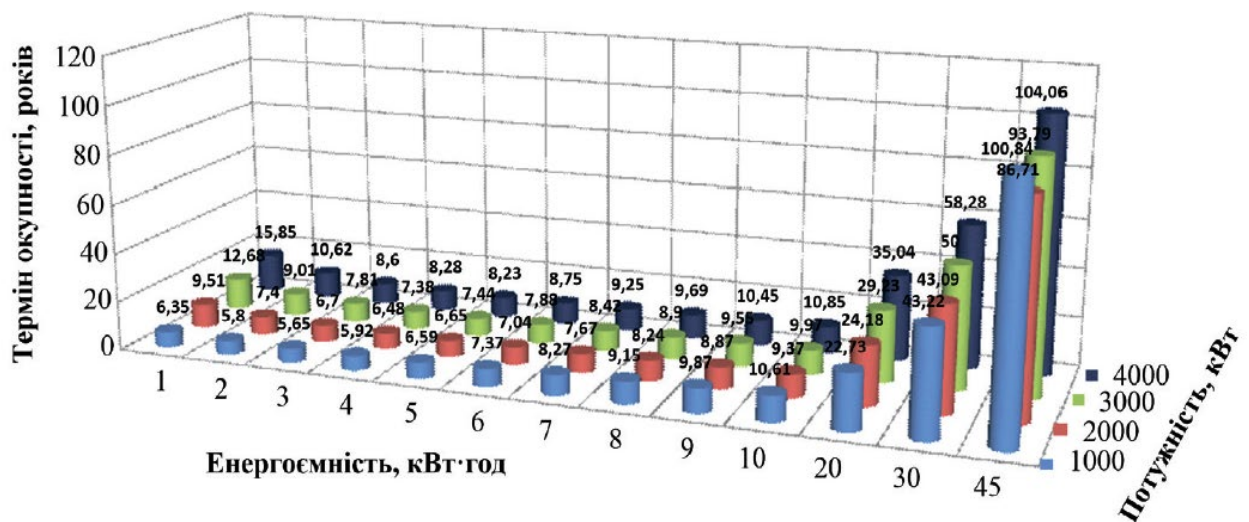


Рисунок 3.5 – Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення[11]

З використанням формули (3.10) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити 16,1 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу.

Аналіз графіків (рис. 3.4) дозволив встановити, що при збільшенні потужності системи накопичення її вартість лінійно зростає, при збільшенні енергоємності – вартість зростає за експонентним законом.

При цьому на початковому етапі підвищення енергоємності системи накопичення вартість має незначне зростання, однак після певної величини енергоємності спостерігається явно виражене різке зростання вартості. Цей факт пояснюється тим, що на даний час технологія виготовлення бортових ЄНЕ обраної номенклатури енергоємності знаходиться на різних стадіях. Системи накопичення енергоємністю до 10 кВт·год виготовляється серійно, в той час як після 10 кВт·год системи накопичення існують лише у вигляді дослідних зразків[11, 12].

*Дев'ятий етап.* За результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення визначається система з раціональними параметрами.

Для впровадження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії за формулою (3.10):

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (3.10)$$

де  $A_{\text{тяги(рік)}}$  – кількість спожитої електроенергії за рік, кВт·год [11].

За результатами аналізу діаграм (рис. 3.3) встановлено наступне:

- з обраних систем накопичення при заданих умовах експлуатації рухомого складу метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 3 кВт·год та максимальною потужністю 1000 кВт. Термін окупності цієї системи мінімальний і складає 5,65 роки;

- максимальний термін окупності має система з величиною робочої енергоємності бортового ЄНЕ 45 кВт·год та максимальною потужністю 4000

кВт, яка здатна зберігати та акумулювати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування. Термін окупності цієї системи складає близько 104 років. Слід зазначити, що у порівнянні з іншими ця система має і найбільші масогабаритні показники. Як наслідок, цю систему недоцільно розміщати за двома чинниками: терміном окупності та масогабаритними показниками;

– динаміка зміни терміну окупності систем накопичення з робочою енергоемністю бортового ЄНЕ до 10 кВт·год незначна, в той час як після 10 кВт·год спостерігається явно виражений характер зростання. В даному випадку було обрано 52 системи накопичення з рівнем потужності і енергоемності. Ймовірно, цього цілком достатньо для того, щоб для заданих умов експлуатації визначити систему з раціональними параметрами. Для більш точного визначення раціональних параметрів потрібно в розрахунках обирати більшу кількість бортових ЄНЕ з різним рівнем енергоемності і потужності (наприклад, замість матриці  $13 \times 4$  обрати  $20 \times 8$ ).

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці комплексного підходу, який би дозволив визначати раціональні параметри бортового ЄНЕ за двома критеріями. Перший з яких – мінімальний термін окупності системи накопичення, а другий – урахування обмежень за масою для цієї системи.

### **3.1.2 Результати досліджень потенціалу використання енергії рекуперації в метрополітені**

Для оцінки потенціалу збереження кількості електроенергії за рахунок застосування енергоефективних систем управління, які дозволяють визначати раціональний режим ведення рухомого складу метрополітену на перегоні, з роботи [12] в КП «Київський метрополітен» виконані експериментальні дослідження. Дослідження здійснювались з використанням випробувального комплексу, до складу якого входить п'ятивагонний поїзд та вимірювальна система, встановлена на його борту. Експерименти виконані під час типових штатних режимів ведення рухомого складу на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик» та «Шулявська–Берестейська–Шулявська» при його

номінальному завантаженні з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху.

Результати досліджень у вигляді графіків залежності кількості спожитої електроенергії від часу руху на перегоні наведено на рис. 3.6. Траєкторії проходження перегону «Хрещатик–Театральна» за умов дотримання «непікового» графіка руху наведено на рис. 3.7.

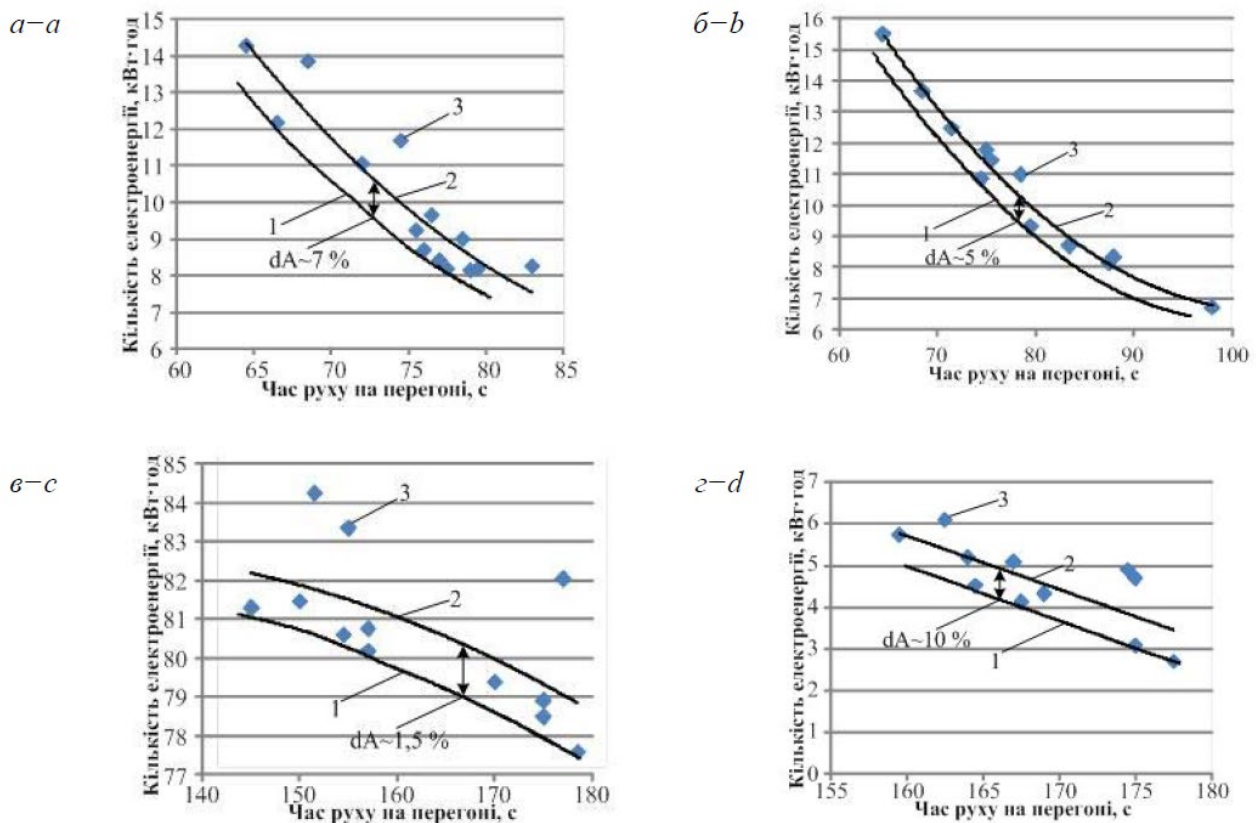


Рисунок 3.6 – Потенціал економії електроенергії за рахунок застосування раціональних режимів ведення поїзда на перегонах «Хрещатик–Театральна» (а), «Театральна–Хрещатик» (б), «Шулявська–Берестейська» (в) та «Берестейська–Шулявська» (г): 1 – мінімально можливе споживання електроенергії; 2 – споживання електроенергії під час типових режимів ведення; 3 – споживання електроенергії під час різних режимів ведення; dA – економія за рахунок застосування енергоефективних режимів ведення[12]

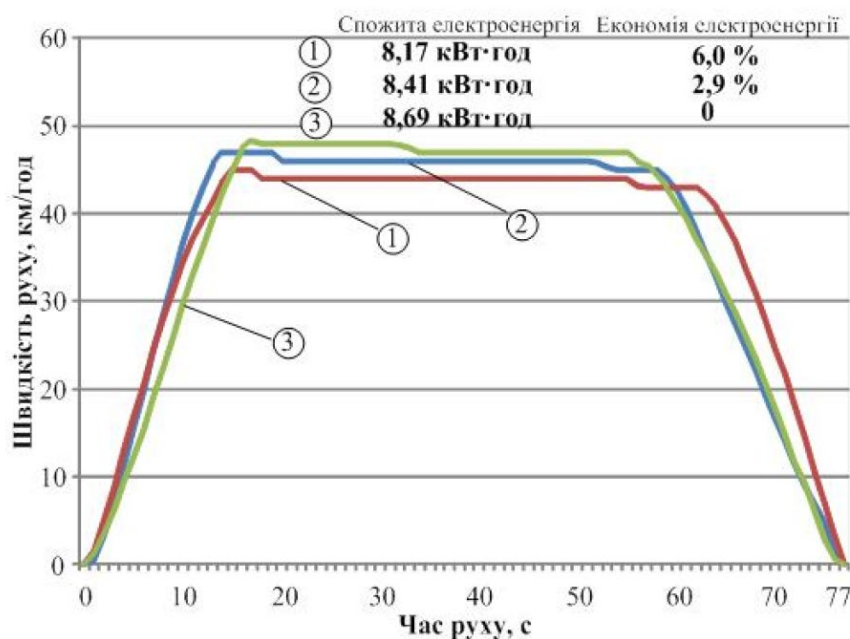


Рисунок 3.7 – Графіки проходження перегону «Хрещатик–Театральна» під час типових режимів ведення рухомого складу за «непіковим» графіком[12]

За виконаними дослідженнями в КП «Київський метрополітен» (див. рис. 3.6, 3.7) встановлено, що потенціал збереження електроенергії за рахунок використання енергоефективних мікропроцесорних систем управління на перегонах: «Хрещатик–Театральна» складає до 7 %; «Театральна–Хрещатик» – до 5 %; «Шулявська–Берестейська» – до 1,5 %; «Берестейська–Шулявська» – до 10 %[12].

### 3.2 Технічні рішення з покращенням енергоефективності за допомогою тепло-вентиляційних установок в метрополітені

#### 3.2.1 Схемні рішення використання теплоти повітря в тунелях метрополітену

З метою вибору схеми для цілорічного кондиціонування повітря ПСМ проведено аналіз технологічних схем ПХМ як з одноступінчастим, так і з двоступінчастим стисненням, а також з відкритим і замкнутим циклом[22]. В умовах експлуатації реверсивної системи вентиляції станції метро доцільно

застосування одноступінчастої розімкнутої схеми з відкритим циклом (рис. 3.8).

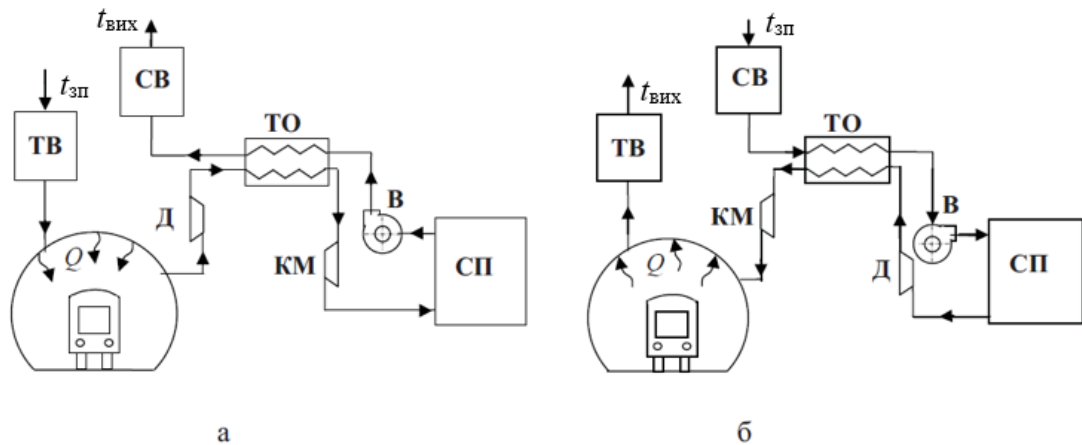


Рисунок 3.8 – Принципові схеми зимового режиму повітряного опалення (а) та літнього режиму кондиціювання (б) приміщень станції метро на базі ПХМ ТВ – тунельна вентиляція; Д – детандер; ТО – теплообмінник; В – вентилятор; КМ – компресор; СВ – станційна вентиляція; СП – службове приміщення;  $t_{зп}$  – температура зовнішнього повітря;  $t_{вих}$  – температура видаляемого повітря[22]

Реалізація цієї схеми ПХМ нам представляється наступним чином. У зимовому режимі роботи ПХМ витяжне повітря видаляється з приміщень, охолоджується в рекуперативному теплообміннику і скидається в атмосферу. Зовнішнє повітря пройшовши через систему вентиляції тунелю надходить в детандер, де розширивши до тиску нижче атмосферного подається на підігрів в рекуперативний теплообмінник. Підігріте повітря після теплообмінника стискається компресором до тиску в приміщенні з кондиціонером приміщення.

У літньому режимі роботи ПХМ повітря з приміщення розширюється в детандері, далі підігрівається до певної температури в рекуперативному теплообміннику, після чого надходить на стиск в компресор і потім скидається в тунель, звідки видаляється по перегоним шахтам. Атмосферне повітря через станційну вентиляцію надходить в рекуперативний теплообмінник, де



охолоджується до необхідної температури зворотним потоком повітря після детандера[24].

На рис. 3.8 (а) представлена принципова схема утилізації теплоти тунельного повітря за допомогою ПТНУ. Схема реалізується таким чином. ПТНУ працює по замкнутому зворотному циклу Брайтона.

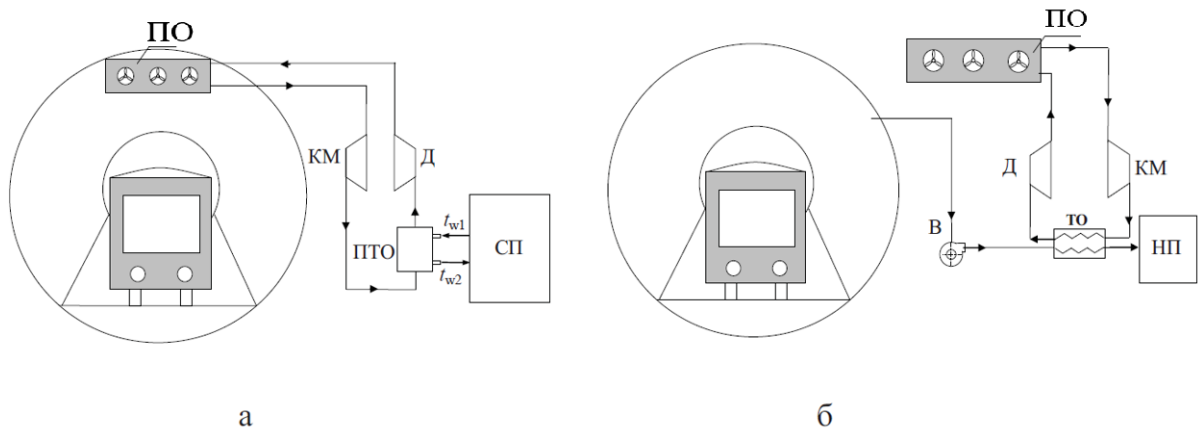


Рисунок 3.8 – Принципові схеми утилізації теплоти тунельного повітря за допомогою ПТНУ (а) і підігріву тунельного повітря за допомогою ПТНУ для опалення наземних приміщень (б): ПО - повітроохолоджувач; KM - компресор; Д- детандер; ПТО - пластинчастий теплообмінник «повітря-вода»; СП – службові приміщення; НП - наземні приміщення;  $t_{w1}$  – температура води на вході в ПТО;  $t_{w2}$  – температура води на виході з ПТО[22]

У верхній частині тунелю розміщується повітроохолоджувач, через який за допомогою осьових вентиляторів прокачується повітря, що знаходиться в тунелі. Стиснутий в компресорі повітря надходить в пластинчастий теплообмінник, в якому відводиться теплота циклу теплоносія (води). Підігріта в теплообміннику вода подається на гаряче водопостачання службових і побутових приміщень розташованих під платформою станції, а також на повітряно-теплові завіси. Після теплообмінника робоча речовина (повітря) надходить в детандер, де розширившись до нижнього тиску в циклі надходить в повітроохолоджувач[22, 23].

На температуру вентиляційного повітря відносно в незначній кількості впливає температура зовнішнього повітря. Вона залежить в першу чергу від

режиму експлуатації систем вентиляції станцій (реверсивний, неревверсивний). За даними робіт [28, 31] для станцій Київського метрополітену температура повітря в тунелі протягом усього опалювального періоду становить 11.4-20.9°C. Слід зазначити, що ці температури незначно відрізняються від аналогічних даних для метрополітенів інших міст.

Нижня межа температур відповідає станцій мілкового закладення. Надлишкова теплота, яка може бути утилізована в ПТНУ з урахуванням обмеження по допустимій температурі охолодження повітря в тунелі, за попередніми розрахунками склала  $60 \div 100 \text{ кВт}$ . Величина  $Q_0$  розрахована з використанням рекомендацій роботи [28] при мінімальному значенні витрати повітря 50 кг/с, необхідного для вентилявання ділянки тунелю в лютому місяці.

На рис. 3.8 (б) приведена схема ПТНУ з підігріву тунельного повітря і подачею його на обігрів наземних торгових приміщень знаходяться поблизу станції метро. Схема також реалізує замкнутий цикл Брайтона, проте в якості джерела низькопотенційної теплоти служить не тунельне, а зовнішнє повітря. Очевидно, що для даної схеми температурні межі циклу будуть найбільшими серед представлених вище схем. В зв'язку з цим, ефективність її застосування багато в чому залежить вибору оптимальних параметрів циклу (ступеня стиснення, температур на вході в компресор і детандер і. т.д).

Ефективність роботи будь-якого термотрансформатора визначається не тільки здатністю забезпечити досить високий коефіцієнт перетворення енергії, а й стійкістю (малою чутливістю) цього коефіцієнта до впливу зовнішнього і внутрішньої незворотності в циклі, зміни температур підведення і відведення теплоти, зміни ККД турбомашин. Чутливість параметрів циклу до впливу внутрішньої незворотності накладає певні обмеження на використання того чи іншого типу компресорів. Наприклад, в регенеративної циклі ПХМ при інших рівних умовах доцільно використовувати відцентрові компресора з низьким ступенем стиснення[22].

### 3.2.2 Дослідження ефективності використання тепло-вентиляційних установок в умовах тунелю метрополітену

На рис. 3.9-3.10 наведено залежності для коефіцієнта перетворення  $COP$  отримані для широкого діапазону зміни температур джерела теплоти  $T_{дт}$  і споживача теплоти  $T_{спож}$ .

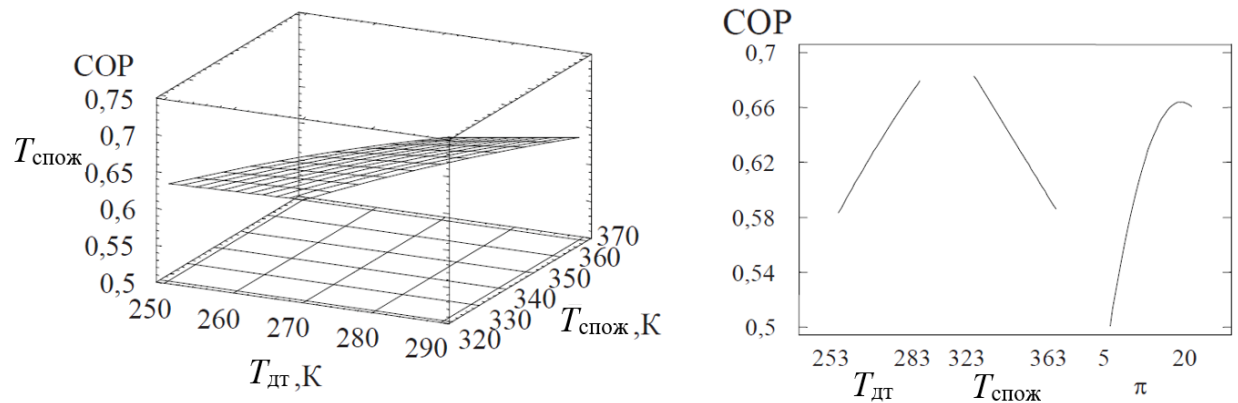


Рисунок 3.9 – Зміна коефіцієнта перетворення  $COP$  в залежності від  $T_{дт}$  температури джерела теплоти і  $T_{спож}$  температури споживача теплоти.

Характер впливу чинників на  $COP$  при заданих

$$\eta_{км} = 0,8; \eta_{дет} = 0,8; \eta_{км}^{мех} = 0,85; \eta_{дет}^{мех} = 0,85; \eta_{ел} = 0,87$$

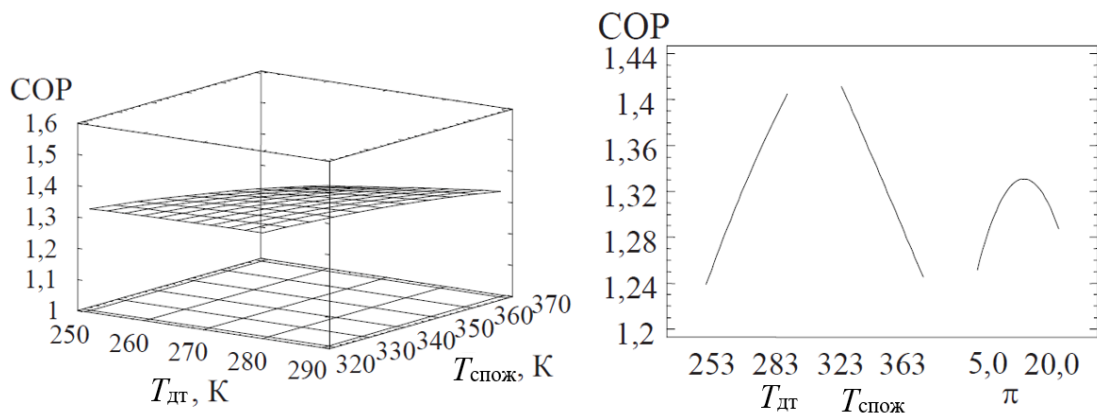


Рисунок 3.10 – Зміна коефіцієнта перетворення  $COP$  в залежності від  $T_{дт}$  температури джерела теплоти і  $T_{спож}$  температури споживача теплоти.

Характер впливу факторів на  $COP$  при заданих:

$$\eta_{км} = 0,95; \eta_{дет} = 0,95; \eta_{км}^{мех} = 0,98; \eta_{дет}^{мех} = 0,98; \eta_{ел} = 0,98$$

Розрахунок циклу проведено з урахуванням рекомендацій робіт [32-34]. Обробка та аналіз результатів розрахунку проводилися з використанням

програмного пакета STATEGRAF, який реалізує метод планування експерименту Бокса-Уілсона.

Як можна бачити з рис. 3.9 і 3.10 для діапазону зміни температур тунельного повітря величина  $COP$  змінюється незначно. При низьких значеннях  $T_{dt} = 260 \div 270$  К, характерних для температур атмосферного повітря в зимовий період  $COP$  змінюється більше. Чутливість  $COP$  до зміни  $T_{dt}$  і  $T_{спож}$  збільшується при зменшенні ККД компресора  $\eta_{км}$  і детандера  $\eta_{дет}$ . При високих значеннях  $\eta_{км}$  і  $\eta_{дет}$  вплив ступеня стиснення в циклі  $\pi$  неоднозначно.

При  $\pi = 8$ ;  $T_{dt} = 260$  К;  $T_{спож} = 323$  К;  $\eta_{км} = 0.75$ ;  $\eta_{дет} = 0.75$  збільшення механічного ККД компресора  $\eta_{км}^{мех}$  від 0,85 до 0,99 призвело до підвищення  $COP$  на 16%. За інших рівних умов збільшення механічного ККД детандера  $\eta_{дет}^{мех}$  від 0.32 до 0.99 привело до підвищенню  $COP$  на 3.8%. Вплив ККД електроприводу  $\eta_{ел}$  на  $COP$  не суттєво[23,24].

На рис. 3.11 приведена поверхня відгуку для  $COP$  на зміну ступеня підвищення тиску  $\sigma$  і ступеня стиснення в циклі  $\pi$ . Величина  $\sigma = T_3 / T_1$ , де  $T_3$  - температура на вході в детандер,  $T_1$  - температура на вході в компресор. Із зв'язку параметрів у характерних точках циклу ПТНУ впливає, що формально  $\sigma$  може задаватись довільно, оскільки не пов'язане з величинами  $\eta_{км}$ ,  $\eta_{дет}$  і  $\pi$ .

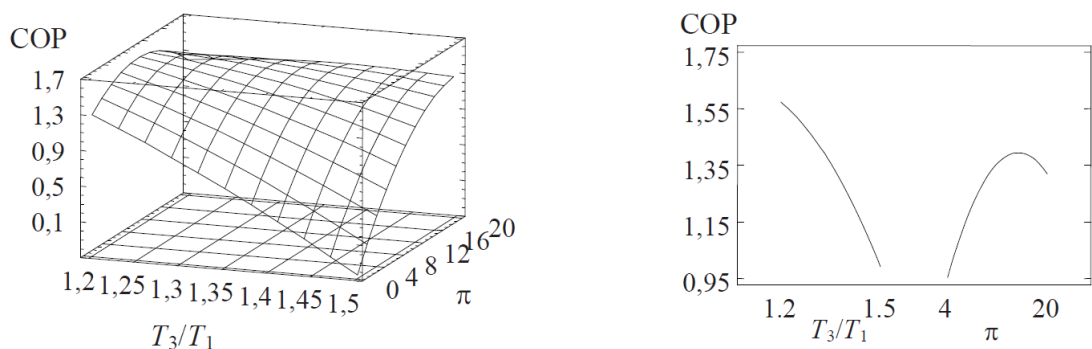


Рисунок 3.11 – Зміна коефіцієнта перетворення  $COP$  в залежності від

$T_3 / T_1$  і  $\pi$ . Характер впливу чинників на  $COP$  при заданих

$$\eta_{км} = 0,95; \eta_{дет} = 0,95; \eta_{км}^{мех} = 0,98; \eta_{дет}^{мех} = 0,98; \eta_{ел} = 0,98[22]$$

Регресійне рівняння для  $COP$  в залежності  $\sigma$  і  $\pi$  має наступний вигляд:

$$COP = 1.56751 + 3.69278 \cdot \sigma - 0.255188 \cdot \pi - 3.27407 \cdot \sigma^2 + 0.267083 \cdot \sigma \cdot \pi - 0.00343229 \cdot \pi^2 \quad (3.10)$$

Рівняння справедливо для діапазону зміни  $\sigma$  та  $\pi$  зазначеного на рис.3.11.

Для відшукування оптимального ступеня стиснення  $\pi_{\text{опт}}$  обмеженням при варіюванні  $\sigma$  є умова  $\eta_{\text{км}}(\sigma - 1) / \left( \pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) < 1$  забезпечує позитивне значення

$COP$ . При заданих  $\eta_{\text{км}}$  і  $\eta_{\text{дет}}$  необхідне дотримання наступного умови

$$\sigma < 1 + \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}}}{\eta_{\text{км}}}, \text{ де } k - \text{показник адіабати} [22].$$

На рис. 3.12 приведена залежність оптимального ступеня стиснення в циклі  $\pi_{\text{опт}}$  від  $T_{\text{дт}}$  і  $T_{\text{спож}}$ . Відповідне регресійні рівняння має наступний вигляд:

$$\pi_{\text{опт}} = -31.3505 - 0.644815 \cdot T_{\text{дт}} + 0.749167 \cdot T_{\text{спож}} + 0.00296296 \cdot T_{\text{дт}}^2 + 0.00333333 \cdot T_{\text{дт}} \cdot T_{\text{спож}} + 0.000416667 \cdot T_{\text{спож}}^2 \quad (3.11)$$

Рівняння справедливо для діапазону зміни  $T_{\text{дт}} = 250\text{-}290$  К і  $T_{\text{спож}} = 323\text{-}363$  К.

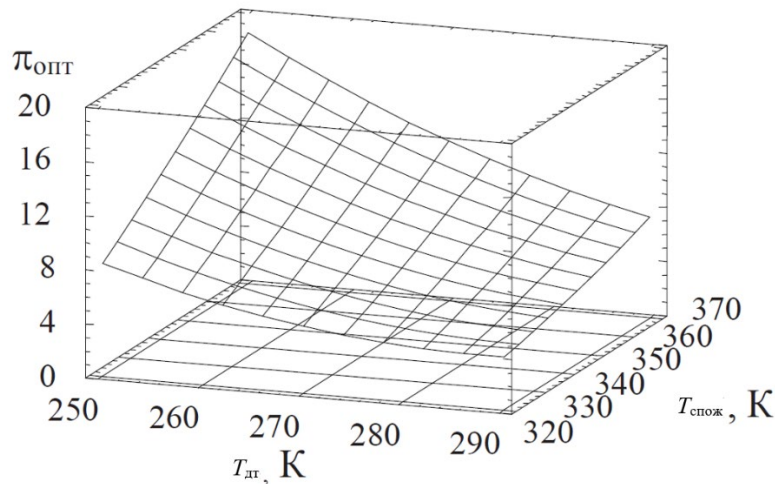


Рис. 3.12 – Залежність оптимального ступеня стиснення в циклі  $\pi_{\text{опт}} = f(T_{\text{дт}}, T_{\text{спож}})$  при заданих

$$\eta_{\text{км}} = 0,95; \eta_{\text{дет}} = 0,95; \eta_{\text{км}}^{\text{мех}} = 0,98; \eta_{\text{дет}}^{\text{мех}} = 0,98; \eta_{\text{ел}} = 0,98$$

Вплив  $\eta_{\text{км}}$  і  $\eta_{\text{дет}}$  на  $COP$  показано на рис. 3.13. Як можна бачити величина  $\mu$  значно більш істотно залежить від  $\eta_{\text{дет}}$ . Аналіз впливу  $\eta_{\text{км}}$  і  $\eta_{\text{дет}}$  на  $COP$  при

зміні  $T_{\text{дт}}$  в діапазоні від 250 до 290 К показав, що зі зниженням  $T_{\text{дт}}$  вплив  $\eta_{\text{км}}$  і  $\eta_{\text{дет}}$  на  $\text{COP}$  тільки посилюється.

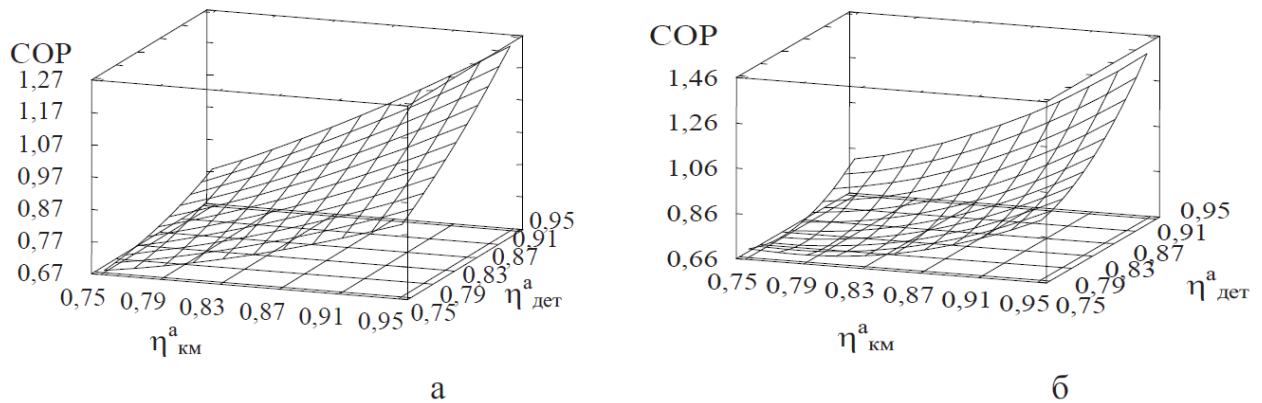


Рисунок 3.13 – Зміна  $\text{COP}$  в залежності від  $\eta_{\text{км}}$  і  $\eta_{\text{дет}}$  при заданих:

*a* –  $T_{\text{дт}} = 263$  К та  $T_{\text{спож}} = 363$  К;  $\eta_{\text{км}}^{\text{мех}} = 0,98$ ;  $\eta_{\text{дет}}^{\text{мех}} = 0,98$ ;  $\eta_{\text{ел}} = 0,98$

*б* –  $T_{\text{дт}} = 290$  К та  $T_{\text{спож}} = 363$  К;  $\eta_{\text{км}}^{\text{мех}} = 0,98$ ;  $\eta_{\text{дет}}^{\text{мех}} = 0,98$ ;  $\eta_{\text{ел}} = 0,98$

Згідно з даними роботи [31] теплова енергія, яка може бути утилізована ТНУ в зимовий період на одній вентиляційній шахті станції глибокого закладення становить 387 кВт. Виходячи з цієї величини проведено розрахунковий аналіз видаткових характеристик ПТНУ в діапазоні зміни теплової потужності  $Q_{\text{т}} = 100\text{--}400$  кВт. На рис. 3.14 приведена залежність об'ємної продуктивності компресора  $V_{\text{км}}$  від об'ємної продуктивності детандера  $V_{\text{дет}}$ . Отримані залежності слід використовувати в передпроектному аналізі при виборі компресора і детандера ПХМ і ПТНУ для схем, представлених на рис.3.8.

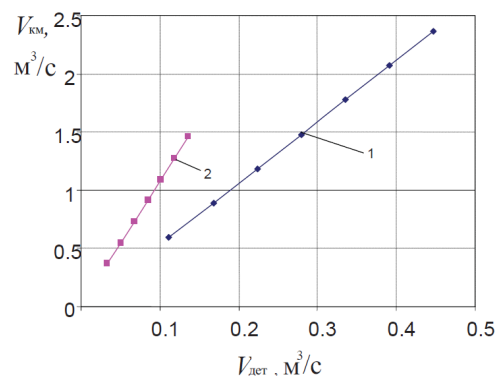


Рисунок 3.14 – зіставлення  $V_{\text{км}}$  і  $V_{\text{дет}}$  в діапазоні зміни  $Q_{\text{т}} = 100\text{--}400$  кВт.

1. Розрахунковий режим  $T_{\text{дт}} = 260$  К;  $T_{\text{спож}} = 323$  К;
2. Розрахунковий режим  $T_{\text{дт}} = 253$  К;  $T_{\text{спож}} = 363$  К[22].

В якості основного комплектуючого обладнання ПТНУ і ПХМ для зазначеного діапазону  $Q_T$  можуть розглядатися наступні марки турбодетандерів і турбокомпресорів: ДТ-5/20, ДТ-6/20 (ВКФ «Кріопром», м.Одеса): ТВ-42-1.4. ТВ-50-1,6 (ТОВ «Миколаївське підприємство» Енергомаш»). Наведені схемні рішення ПТНУ і ПХМ можуть бути реалізовані як в проектах нових станцій метро, так і при реконструкції систем опалення та вентиляції існуючих станцій. Опалювально-вентиляційне обладнання станцій метро побудованих близько 35-40 років тому і більшості випадків знаходиться практично на межі повного вичерпування свого ресурсу. У зв'язку з цим, впровадження ПТНУ і ПХМ особливо актуально, оскільки дозволить без суттєвої реконструкції прийнятої системи вентиляції забезпечити одночасне вентилявання і повітряне опалення приміщень в зимовий період. Крім того, в комплексі може бути вирішене питання кондиціонування повітря для тих приміщень метро, для яких кондиціонування необхідно по реальних умов їх експлуатації, проте в яких воно в силу різних причин не передбачено за проектом[22, 31].

Розрахункові дослідження показали можливість досягнення практично прийнятних значень  $COP$  ПТНУ однак, за умови оптимізації ступеня стиснення в термодинамічному циклі. Отримані регресійні рівняння дозволяють на стадії проектування технологічних схем ПХМ і ПТНУ визначати найбільш раціональні режимні параметри установки в умовах обмежень пов'язаних з температурами джерела і приймача теплоти, а також значень ККД існуючих турбомашин.

### **3.3 Отримані результати при розробці вирішення оптимізації енергоспоживання шляхом встановлення ВЕУ в тунелі**

#### **3.3.1 Аналіз конструктивних особливостей та вибір обладнання ВЕУ в умовах тунелю метрополітену**

З урахуванням необхідності наявності вітру для роботи вітрогенераторів, був проведений аналіз літератури і отримані наступні дані:



середня швидкість руху поїздів в метро становить 40-50 км/год, а з урахуванням зупинок, розгонів і гальмувань - 40 км/год[35, 36].

Таблиця 3.5 – Статистика середніх швидкостей метропоїздів в містах СНД[35]

№	Назва міста	Середня швидкість руху поїздів, км/год(м/с)
1.	Київ	43,4 (12,05)
2.	Москва	48,6 (13,5)
3.	Санкт-Петербург	45,2 (12,55)
4.	Мінськ	47,9 (13,83)



Рисунок 3.15 – Розміщення обладнання в тунелі метрополітену[35]

Як видно з рис. 3.15 в тунелях метро можливо встановлювати обладнання різного призначення. При цьому ми бачимо, що є достатньо місця для установки вітрогенераторів з малим діаметром.

Найбільш ефективно буде працювати вітрогенератор з п'ятьма лопатевою конструкцією. Вона має набагато більше геометричне заповнення. Звідси



впливає висока обертовість при відносно малому вітрі, а також велика швидкохідність, що є гарним показником.

Матеріалом для виготовлення основи вітроколеса, за винятком лопатей, послужить алюміній, так як він має малу вагу і достатню міцність. Так само він не схильний до корозії, що в умовах метро дуже необхідно.

Для автономної роботи будь-якого вітрогенератора необхідна мінімальна швидкість вітру дорівнює 2 м/с.(за паспортними даними). На рисунку 3.16 представлений графік залежності швидкості вітру в залежності з наближенням рухомого складу до вітрогенератору[35].

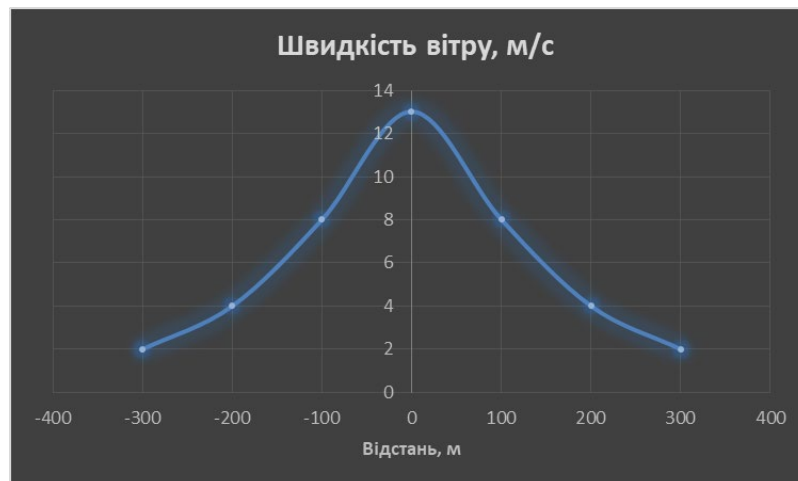


Рисунок 3.16 - Графік залежності швидкості вітру в залежності з наближенням рухомого складу до вітрогенератору

Для визначення допустимих розмірів вітрогенератора з вертикальною віссю обертання були спроектовані креслення з габаритами рухомого складу, споруд та обладнання. При цьому враховувалося те, що обслуговуючий персонал повинен вільно переміщатися по тунелю і не мати ніяких перешкод[37].

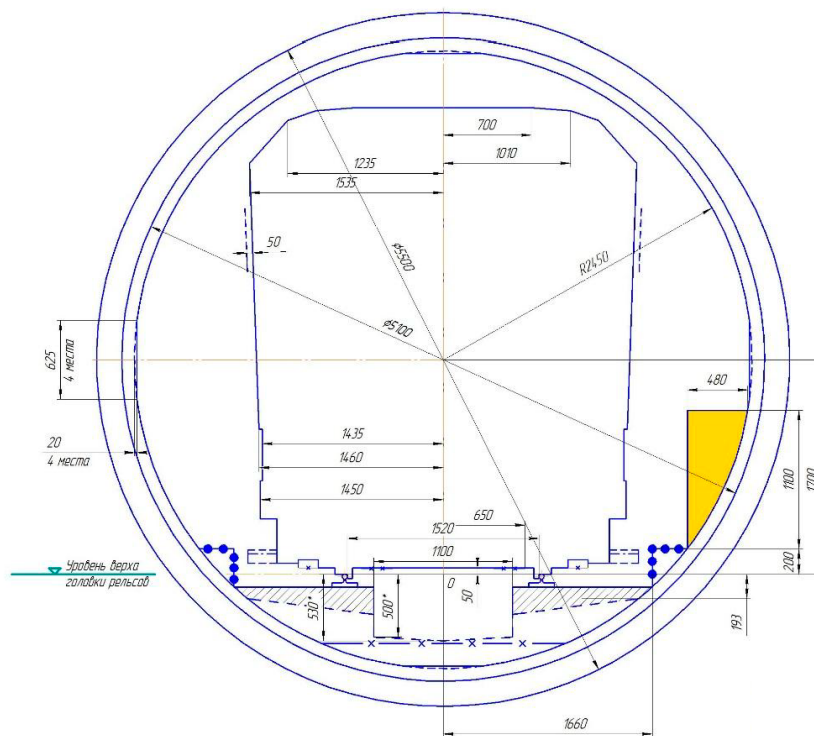


Рисунок 3.17 - Креслення габаритів обладнання, рухомого складу та наближення будівель [38]

З рис.3.17 бачимо, що вітрогенератор повинен бути в межах габаритів 480x1100 мм (виділена жовтим ділянкою). Короткий інтервал між поїздами (3...4 хв. В години «пік» знижується до 1,5 хв) з нетривалим (3,5...4 год і тільки в нічний час) забезпечить практично безперебійну роботу вітрогенераторів в тунелях метро[38].

### 3.3.2 Розрахунок величини потужності ВЕУ в тунелі

Для проведення розрахунків і визначення енергії, що виробляється скористаємося наступними даними: робота метрополітену на добу 18 годин, довжина вагона в поїзді метро - 19,2 м, в середньому в поїзді 6 вагонів, середній інтервал між поїздами 3 хвилини, швидкість руху поїзда на перегонних ділянках 60 км/год (16,7 м/с)[.

Тоді маємо:

Час роботи метрополітену в хвилинах:

$$t_{\text{доб}} = 18 \cdot 60 = 1080 \text{ хв} \quad (3.12)$$

Розрахуємо кількість поїздів, які проїжджають повз вітрогенератор за добу:

$$N_{\text{доб}} = \frac{1080}{3} = 360 \text{ поїздів} \quad (3.13)$$

Довжина одного поїзду:

$$L_{\text{п}} = 19,2 \cdot 6 = 115 \text{ м} \quad (3.14)$$

Розрахуємо час за який проїжджає поїзд повз вітрогенератор (при максимальній швидкості обертів вітрогенератора 16,73 м/с):

$$t_{\text{повз}} = \frac{115}{16,7} = 7 \text{ с} \quad (3.15)$$

Розрахуємо час роботи одного вітрогенератора при швидкості вітру 16,73 м/с (на добу):

$$t_{\text{max v}} = 360 \cdot 7 = 2520 \text{ с} = 42 \text{ хв} = 0,7 \text{ год} \quad (3.16)$$

Визначимо потужність, що виробляється одним вітрогенератором.

Потужність вітрогенератора залежить від потужності повітряного потоку (N), яка визначається швидкістю вітру і захоплюваної площею [39,40]:

$$N = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (3.17)$$

де:  $V$  - швидкість вітру,

$\rho$  - щільність повітря,

$S$  - захоплювальна площа.

Захоплювальна площа – площа через яку проходить вітровий потік. Для пропелерних вітрогенераторів, це площа кола:

$$S = \frac{3.14 \cdot D \cdot 2}{4} \quad (3.18)$$

де  $S$  - захоплювальна площа,

$D$  - діаметр пропелера.

Для вертикальних:

$$S = D \cdot H \quad (3.19)$$

де  $D$  - діаметр вітроколеса,

$H$  - його висота.

Прийmemo  $D = 0,35$  м,  $H = 0,6$  м.

Щільність повітря  $\rho = 1,28$  кг/м<sup>3</sup>.

Захоплюєма площа  $S = 0,35 \cdot 0,6 = 0,21$  м<sup>2</sup>

Визначимо потужність одного вітрогенератора при максимальній швидкості вітру 16,73 м/с:

$$P = \frac{1,28 \cdot 0,21 \cdot 16,73^3}{2} = 629 \text{ Вт} \quad (3.20)$$

Далі підставляючи швидкості  $V$  отримаємо:

$$N_1 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} = \frac{1,28 \cdot 0,21 \cdot 2^3}{2} = 1,07 \text{ Вт при } 2 \text{ м/с};$$

$$N_2 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} = \frac{1,28 \cdot 0,21 \cdot 4^3}{2} = 8,6 \text{ Вт при } 4 \text{ м/с};$$

$$N_3 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} = \frac{1,28 \cdot 0,21 \cdot 8^3}{2} = 68,81 \text{ Вт при } 8 \text{ м/с};$$

$$N_4 = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} = \frac{1,28 \cdot 0,21 \cdot 12^3}{2} = 232,24 \text{ Вт при } 12 \text{ м/с};$$

Визначимо час роботи вітрогенератора при наближенні і видаленні поїзда, тобто при різних швидкостях вітру.

Швидкість вітру, зазначена точками на графіку (2, 4, 8 м/с) буде середня при проїзді поїздом чергових 100 метрів шляху (50 метрів до точки, 50 метрів після). Графік по наближенню симетричний графіку з віддалення, отже, розрахункові значення множаться на два (тобто кожна точка графіка швидкості вітру вважається для 200 метрів). Ділянки наближення і видалення по 50 метрів до і після місця розташування вітрогенератора розрахуємо як одну ділянку довжиною 100 метрів з середньою швидкістю вітру 12 м / с.

Розрахуємо час проїзду поїздом ділянок 200 метрів і 100 метрів:

$$t_1 = \frac{200}{16,73} = 12 \text{ с}$$

$$t_2 = \frac{100}{16,73} = 6 \text{ с}$$
(3.21)

Визначимо час проїзду потягами даних ділянок 200 метрів і 100 метрів протягом доби:

$$T_1 = 12 \cdot 360 = 4320 \text{ с} = 1,2 \text{ год}$$

$$T_2 = 6 \cdot 360 = 2160 \text{ с} = 0,6 \text{ год}$$
(3.22)

Визначимо кількість виробленої енергії (по окремих дільницях) на добу, враховуючи коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) рівний 0,5:

$$A = (629 \cdot 0,7 + 1,07 \cdot 1,2 + 8,6 \cdot 1,2 + 68,8 \cdot 1,2 + 232,2 \cdot 0,6) \cdot 0,5 = 336,8 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

При установці 10 вітрогенераторів будемо отримувати енергію приблизно рівну 3,36 кВт · год на добу.

### **Висновки до розділу:**

1) За результатами даних експериментальних досліджень встановлено наступне: реалізація рекуперативного гальмування під час заданих умов експлуатації модернізованого поїзда між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії дозволяє зберегти близько 20 % електроенергії, витраченої на тягу; існує значний резерв енергозбереження за рахунок використання надлишкової електроенергії, яка за відсутності споживачів виділяється у вигляді тепла на резисторах та складає близько 15 % електроенергії, витраченої на тягу; шляхом модернізації існуючого рухомого складу його енергоефективність підвищується більш ніж на 35 %.

Впровадження системи накопичення з раціональними параметрами для заданих умов експлуатації дозволить заощадити на рівні 16,1 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу.

2) Розрахункові дослідження показали, що застосування теплонасосних систем теплохолодопостачання за розглянутою схемою забезпечує термобалансування параметрів мікроклімату на рівні з традиційними

технологіями. При цьому в порівнянні з традиційними технологіями нагрівання та охолодження припливного повітря забезпечуються 72%-ва економія енергії в опалювальний період і 15%-ва економія енергії в період охолодження (кондиціонування). Терміни окупності додаткових капітальних вкладень, в залежності від темпів щорічного зростання тарифів, складають від 5 до 14 років. Тут важливо зазначити, що питома вага подорожчання будівництва в загальному обсязі інвестицій становить менше 0,4%.

3) Проаналізувавши розрахунки, можна зробити висновок про те, що застосування вітрогенераторів в метрополітені може забезпечити енергією: інформаційні стійки (стенди), місця для зарядки телефонів, термінали банкоматів (як джерела безперебійного живлення), слабкострумові системи, освітлення тунелів, аварійно-ремонтні бригади при роботі в нічний час. А також, акумулювати енергію для подальшого використання.

## **4 СТАРТАП ПРОЕКТ**

В магістерській дисертації запропоновано комплекс підходів з метою управління електроспоживанням на об'єктах підземного транспорту. Це дасть можливість заощадити витрати на електричну енергію підприємству КП «Київський метрополітен».

Метою цього розділу є проведення маркетингового аналізу стартап-проекту, проведення порівняльного аналізу показників власної ідеї та конкурентів. Визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

### **4.1 Опис ідеї проекту**

Для опису ідеї проекту слід послідовно проаналізувати:

- міст ідеї проекту;
- можливі напрямки застосування;
- основні переваги, що може отримати користувач товару;
- відмінність від існуючих аналогів та замінників.

Ідея для стартапу полягає в тому, що кожний із запропонованих підходів об'єднати в єдину мережу і розробити моніторингову систему на базі Smart Grid, яка дозволить у режимі реального часу спостерігати за робочими режимами обладнання та отримувати необхідні виміри.

Розроблювана в даній роботі автоматизована моніторингова система має високий потенціал до комерційного застосування, оскільки наразі на ринку відсутні аналоги, які би в повній мірі покривали спектр її можливостей. На рис. 4.1 наведена принципова схема даної схеми.

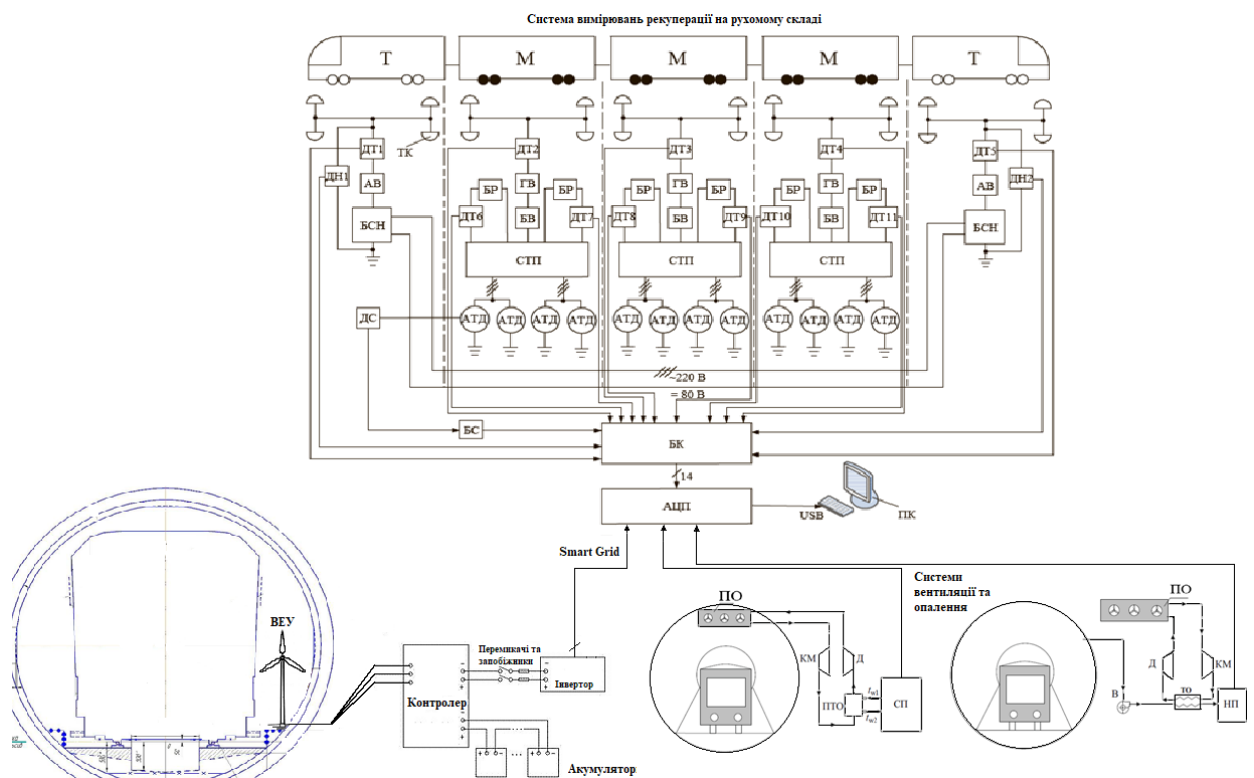


Рисунок 4.1 – Принципова схема системи моніторингу на базі Smart Grid

В таблиці 4.1 наведена інформація про систему моніторингу та наведені переваги для кінцевого споживача:

Таблиця 4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Переваги
Застосування системи моніторингу за робочими режимами енергоефективного обладнання метрополітену на базі технологій Smart Grid	Електрифікований транспорт (Метрополітен)	Зручний метод виводу інформації для персоналу
		Моніторинг в режимі реального часу за режимами роботи обладнання
		Управління енергоефективністю на підприємстві



Відмінністю даного стартап-проекту від його аналогів є застосування технологій Smart Grid, які забезпечують високу швидкість передачі даних та комфортного виводу інформації на монітор комп'ютера обслуговуючого персоналу. Саме ці нововведення дозволить ефективно керувати електроспоживанням в електрифікованому транспорті, а також вчасно реагувати на будь-які технічні несправності обладнання.

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

	<b>Техніко-економічні характеристики ідеї</b>	<b>W (слабка сторона)</b>	<b>N (нейтральна сторона)</b>	<b>S (сильна сторона)</b>
Мій проект	Система моніторингу за режимами роботи енергоефективного обладнання	Можлива вразливість до взлому мережі або несправність роботи через електромагнітний вплив	Висока швидкість передачі даних та комфортного виводу інформації на монітор комп'ютера	Моніторинг в режимі реального часу за режимами роботи обладнання
Конкурент	Автоматика і телемеханіка системи «Граніт» КП «Київський метрополітен»	Підлогове обладнання, потребує ретельного огляду та обслуговування	Наявність вбудованих обчислювальних засобів, які обробляють інформацію	Безвідмовна робота протягом багатьох років експлуатації

## 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів. Аналіз наведено у табл.4.3:

Таблиця 4.3 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<b>Потреба, що формує ринок</b>	<b>Цільова аудиторія</b>	<b>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</b>	<b>Вимоги гірничо-видобувних підприємств до товару</b>
Необхідність зменшення витрат на електроенергію	Київський метрополітен	Фіксована інтервальність рухів потягів	Доступність технології
Необхідність заміни старого обладнання	Харківський метрополітен	Особливості електропостачання метрополітену	Надійність впроваджуваної системи
Енергозбереження	Дніпровський метрополітен	Ретельне обслуговування інфраструктури метрополітену	Простота експлуатації системи

## ВИСНОВКИ

В результаті досліджень, проведених в магістерській дисертації проаналізовано перспективні методи енергозбереження методом ефективного накопичення та використання енергії рекуперації, заміна електричного опалення на теплонасосні установки для економії витрат на електроенергію, розглянуто використання вітрової енергетики від повітряних потоків в умовах тунелю. Застосування таких енергозберігаючих технологій дозволить заощадити значну кількість витрат на електричну енергію. Роблячи висновок із розрахунків можна сказати, що кожна із запропонованих концепцій тою чи іншою мірою дозволяє регулювати електроспоживання в системі. Але, як наприклад, з системою накопичення рекуперації, наразі ці показники мають не високі значення. Технічний прогрес не стоїть на місці, а тому в майбутньому запропоновані підходи стануть невід'ємною частиною електричної системи електрифікованого транспорту.

Опалення та вентиляція – являє собою одну з основних систем підземного електрифікованого транспорту. Не можна представити роботу метрополітену без якісного постачання тепла та свіжого повітря. Обладнання, яке забезпечує ці функції потребує значних капіталовкладень, а тому замінюється не часто. В дисертації пропонується використати тепло, яке вентиляційне обладнання виводить на поверхню, для забезпечення балансованого клімату в підземних приміщеннях. Таке тепло буде джерелом низькопотенціального тепла для теплонасосних установок, і дозволить отримати 72%-ва економію енергії в опалювальний період і 15%-ва економію енергії в період охолодження (кондиціонування).

Вітрові генератори в метрополітені мають перспективу використання лиш у тому випадку, коли ця технологія буде більш технологічно розвиненою та більш доступною в запровадженні. Наразі такі системи являють собою не дешеве джерело відновлювальної енергії, а невеликі габарити в умовах тунелю не можуть забезпечити високу ефективність такої установки.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Метрополитены мира [Електронний ресурс] // Федеральное агентство по образованию Российской Федерации. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: [https://works.doklad.ru/view/tZ\\_zvevZI2Y.html](https://works.doklad.ru/view/tZ_zvevZI2Y.html).
2. Кочетков А. А. Московский метрополитен / Анатолий Андреевич Кочетков. – Москва, 2020. – 101 с. – (ISBN (EAN): 9785001494232; кн. 13050192).
3. Ермилова А. В. Метрополитен – основа транспортной системы большого города / Алина Владимировна Ермилова. // Сборник трудов VIII Конгресса молодых ученых. Том 6. – 2005. – С. 67–71.
4. Фролов Ю.С., Голицкий Д.М., Ледаев А.П. Метрополитены. Учебник для вузов. – М.: Желдориздат, 2001. – 528 с.
5. Инновации в научно-исследовательской деятельности в области тоннеле и метростроения / Под ред. В.А. Гарбера. – М.: ЦНИИС, 2011. – Вып. 260. – 104 с.
6. Федоренко Д. С. Системи розподілу електричної енергії в мережі метрополітену : 05.14.02:141 / Федоренко Дмитро Сергійович – Київ, 2019. – 104 с. / НТУУ «КПІ» ім.І.Сікорського». баклавр.
7. Энергетика тяговых сетей: монография / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. – Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.
8. Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.22.09 "електротранспорт" / Саблін Олег Ігорович – Дніпро, 2019. – 41 с.
9. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / Донченко А. В., Мужичук С. О., Сулим А. О., Хозя П. О., Мельник О. О. // Рейковий рухомий склад. 2015. Вип. 12. С. 48–56.

10. Жемеров Г.Г., Тугай Д.В., Холод О.І. Энергоэффективность систем электроснабжения подвижного состава метрополитена // Технічна електродинаміка. – 2014. – №1. – С. 67–74.

11. Фомін О. В. Визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену / О. В. Фомін, А. О. Сулим, П. О. Хозя. // Производственно-технологические системы: на заметку энергетика. – 2018. – №2. – С. 45–55.

12. Донченко А. В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2016, № 3 (63). – 2016. – С. 107–118.

13. Реклама в киевском метрополитене - презентация [Електронний ресурс] // Elmedia Ltd.. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.myshared.ru/slide/61356/>.

14. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 6, № 8 (72). С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483

15. Донченко А. В. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим. // Збірник наукових праць ДП "УкрНДІВ. – 2015. – С. 48–56.

16. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji uk ad w zasilania trakcji tramwajowej / Szeląg A., Maciolek T., Drąg Z., Patoka M. // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. 2011. Issue 3. P. 34–42.

17. Рябов Е. С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети // Вісник Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут». 2015. № 6 (1115). С. 132–137.

18. Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2012. Vol. 24. P. 36–49. doi: 10.1016/j.trc.2012.02.001

19. Рыбалко А. Я., Дыбрин С. В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 8. С. 356–361.

20. Костин Н. А., Никитенко А. В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока // Залізн. трансп. України. 2014. Вип. 3. С. 15–23.

21. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / Yang X., Chen A., Li X., Ning B., Tang T. // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2015. Vol. 57. P. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002

22. Харлампи́ди Д. Х. К вопросу применения воздушного теплонасосного цикла брайтона для систем теплохладоснабжения станций метрополитенов / Д. Х. Харлампи́ди, В. А. Тарасова. // Энергетика. – 2012. – С. 40–48.

23. Безродний М. К. Енергетична ефективність системи вентиляції з використанням рекуператора та теплового насосу / М. К. Безродний, М. А. Галан. // «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – 2011. – С. 5–13.

24. 1. Фиалко Н. М. Утилизация энергии выбросов систем местной вентиляции метрополитенов с помощью тепловых насосов/ Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, С. В. Дубовской//Промышленная теплотехника. – 2000. – Т. 22. – № 1. – С. 90 – 93.

25. Зимин Л. Б. Опытная установка для утилизации низкопотенциальной теплоты вентиляционных выбросов метрополитена// Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23. – № 1–2. – С. 92–95.
26. Маслак В. А. Возможности энергоэффективных технологий применительно к теплосантехническим устройствам метрополитена / В. А. Маслак. // Метро и тоннели. – 2019. – №2.
27. Зимин Л. Б. Сопоставление показателей традиционных и теплонасосных систем теплоснабжения метрополитенов/Л. Б. Зимин, Н. М. Фиалко// Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25. – № 4. – С. 68–72.
28. Зимин Л. Б. К вопросу использования теплового потенциала вентиляционных выбросов метрополитенов//Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21. – № 1. – С. 44–47.
29. Васильев Г. П. Теплонасосные системы теплохладоснабжения объектов Московского метрополитена [Электронный ресурс] / Г. П. Васильев // АВОК №2'2018. – 2018. – Режим доступа до ресурсу: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6859](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6859).
30. Калнинь И. М. Анализ эффективности воздушных и парокомпрессионных холодильных машин при положительных температурах охлаждения/И. М. Калнинь, И. Я. Сухомлинов, Б. Л. Цирлин, Н. Э. Чистяков// Холодильная техника. – 1976. – № 4. – С. 12–18.
31. 6. Диденко Л. Н. О возможности использования низкопотенциальной теплоты вентиляционных выбросов метрополитенов для теплоснабжения городских объектов/Л. Н. Диденко, С. В. Дубовской, Л. Б. Зимин// Материалы Конгресса по энергоресурсосбережению «Ресурс 97». – Киев: – С. 155–162.
32. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Негоциант. – 2006. – 721 с.
33. Yuehong BI. Energetic efficiency optimization for irreversible heat pump working on Brayton cycle//BI.Yuehong, Chen Lingen, Sun Fengrui// Pramana journal of physics. – 2010. – Vol.74. – № 3. – P. 351–363.

34. Систо Ф. Обратный открытый цикл Брайтона и перспективы его применения в теплонасосных системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха// Энергетические машины и установки. – 1979. – № 1. – С. 175–181.

35. Мороз А. Ф. Применение ветрогенераторов с вертикальной осью вращения в условиях метрополитена / А. Ф. Мороз. // Труды XXII Всероссийской научно-практической конференции. – 2019. – С. 134–139.

36. Безруких П.П., П.П. Безруких (мл.), С.В. Грибков Ветроэнергетика. Справочно-методическое издание. «Теплоэнергетик» Москва, 2014 – Том 1, УДК 621.47.

37. EnergyLand: Интернет портал сообщества ТЭК: ВЭУ с вертикальной осью вращения: сравнительная оценка технических решений и перспективы развития – URL: <http://www.energyland.info/analitic-show-52412>. Дата обращения: 20.05.2017

38. Метрополитены. Габариты приближения строений оборудования и подвижного состава. ГОСТ 23961-80

39. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. «Энергоатомиздат» Санкт-Петербургское отделение, 2000. ISBN 5-283-045080

40. Иванов – Смоленский А.В. Электрические машины. Издательство МЭИ. 2004. – Том 1 УДК 621.313.

41. Мирошниченко А. А. Исследование возможности использования воздушных потоков, возникающих при движении подвижного состава в тоннеле / А. А. Мирошниченко. // Устойчивое развитие науки и образования. – 2018. – С. 242–250.

42. 1. International Energy Outlook. Washington: United States Department of Energy, 2007.

43. Ковалев, А. А. Повышение энергоэффективности тяговых подстанций/ А. А. Ковалев, Е. А. Честюнин // Энергетика, электропривод, энергосбережение и экономика предприятий, организаций и учреждений, 2013



п.,Екатеринбург/ун-т,Ин-т электроэнергетики и информатики. - Екатеринбург, 2013. - С. 56-60.

44. Общий курс железных дорог: Учеб. пособие для студ. Учреждений сред. проф. образования / Ю. И. Ефименко, М. М.Уздин, В. И. Ковалев и др.;

Под ред. Ю. И. Ефименко. - М.: Издательский центр «Академия», 2005.

45. Абрамов Е. Р. Электровозы ВЛ65, ЭП1 и их разновидности //Электроподвижной состав отечественных железных дорог. - М., 2015. - С. 234-241.

46. Быков Б.В. Устройство и техническое обслуживание пассажирских вагонов. -М.: Желдориздат, 2006, - 344 с.